



АКАДЕМИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ – АО «КОНЦЕРН
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ» ЭЛЕКТРОПРИБОР»



ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВО РАН



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОРСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ИМ. АКАДЕМИКА М.Д. АГЕЕВА ДВО РАН



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ»



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ ГРУППА РОССИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА ПО
АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ
МЕЖДУНАРОДНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ «ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И
НАВИГАЦИИ»

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЕМИНАР
NMC 2023

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ

02-06 ОКТЯБРЯ 2023

Санкт-Петербург
2023

Международный семинар «Навигация и управление движением» (NMC 2023). Материалы / Под редакцией В.Г. Пешехонова, академика РАН, и члена-корреспондента РАН О.А. Степанова, проф. / АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия, 2023.

Настоящий сборник содержит материалы Международного семинара «Навигация и управление движением», организованного АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» при поддержке Академии навигации и управления движением, Института автоматики и процессов управления ДВО РАН, Института проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, Университета ИТМО, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербургской группы Российского Национального комитета по автоматическому управлению.

Семинар проводится 2-6 октября 2023 года в г. Владивостоке, Россия.

ISBN 978-5-91995-098-1

© АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,
Санкт-Петербург, Россия, 2023

© Академия навигации и управления движением,
Санкт-Петербург, Россия, 2023

**Международный семинар
«Навигация и управление движением»
(NMC-2023)**

1. А.Ю. Кретов, П.Ю. Кретов, А.В. Некрасов, В.В. Тихомиров, Е.В. Бабаев Перспективы практического применения акустических систем азимутальной коррекции	5
2. С.Ю. Шевченко, Д.А. Михайленко Влияние габаритов и топологии встречно-штыревых преобразователей на характеристики чувствительного элемента в форме кольца на поверхностных акустических волнах	7
3. Е.А. Якушина Разработка и испытания макетного образца наклономера на базе маятникового компенсационного акселерометра с автокомпенсацией	12
4. Р.А. Романов, М.А. Барулина Проблемы исследования напряженно-деформированного состояния чувствительных элементов МЭМС/НЭМС-датчиков	15
5. А.С. Завигаев, М.И. Евстифеев Исследование инструментальных погрешностей ядерного магнитного гироскопа	17
6. В.Д. Костенко, М. А. Барулина К вопросу использования радиостойкого стекла для изготовления микромеханического акселерометра	21
7. Xiangxiang Lu, Chuang Pei, Qianyun Zhao, Jian Liu, Jieying Wang, Junxin Wei Generation of a high-flux and collimated rubidium atom beam source.....	24
8. Maochun Li, Xiaoming Zhao, Miao Yan, Fei Hui, Fan Li Direct Coupling Technology of Hollow-core Microstructure Fiber Optic Gyroscope	28
9. Zhouxiang Wang, Jing Feng, Wei Luo, Miao Yan, Weiqiang Sun, Bohan Liu Optical design of a fiber Mach-Zehnder interferometer based three-photon fiber optic gyroscope	33
10. И.С. Можаровский Построение моделей виртуального анализа для подсистем управления технологическим процессом производства бензина.....	37
11. С.В. Стабров, С.А. Шевлягина, А.А. Плотников Анализ структур управления массообменного технологического объекта с парциальным конденсатором	40
12. О.А. Степанов, Ю.А. Литвиненко, А.М. Исаев Сравнительный анализ рекуррентных алгоритмов калмановского типа в задачах полиномиальной фильтрации.....	43
13. В.В. Богомолов Позиционирование автономного необитаемого подводного аппарата по измерениям дальностей от менее трех гидроакустических маяков на основе рекуррентных методов байесовского оценивания.....	48
14. А.М. Грузликов, В.Г. Караулов, В.П. Золотаревич Оценка углов ориентации АНПА в задаче приведения к базовой станции	53
15. П.А. Пятавин Метод автоматической стыковки необитаемых подводных аппаратов с использованием многозвенных манипуляторов.....	57

16. В.А. Оселедец Разработка системы управления группой автономных необитаемых подводных аппаратов в заранее неизвестной обстановке	60
17. А.П. Юрманов, М.О. Панчук Система поддержки деятельности операторов интервенционных подводных аппаратов, оснащенных гидроакустическим каналом связи	63
18. Jiajun Leng Research on path planning algorithm based on D* search	66
19. О.А. Степанов, Ю.А. Литвиненко, А.М. Исаев Приближенный анализ точности решения задачи навигации по геофизическим полям для инвариантной и неинвариантной схем обработки	71
20. Shuaipeng Gao, Tijing Cai A confidence assessment method for positioning errors in gravity-aided navigation	76
21. Meng Liu, Xiaoming Zhao, Chongmeng Zhang, Yongzhao Wang Influence Mechanism Analysis of Position Error for Underwater Long-duration INS	80
22. Guo H.R., Hu L.L., Li L., Wang J.G. Attitude Subdivision Technology Based on Triaxial High Precision Gyroscope	85
23. О.А. Степанов, В.А. Васильев, А.М. Исаев Субоптимальный алгоритм решения задачи коррекции навигационной системы при изменчивом характере ее погрешностей по данным о геофизических полях	90
24. И.Б. Фуртат (приглашенный доклад) Синтез закона управления с использованием свойств плотностных систем	96
25. А.С. Губанков, И.В. Горностаев Метод формирования программных сигналов для кинематически избыточных манипуляторов	98
26. Э.Ш. Мурсалимов, И.М. Григорьев Метод автоматического формирования траекторий движения рабочего органа многостепенных манипуляторов при обработке объектов сложной формы.....	101
27. А.А. Тимошенко, В.Ф. Филаретов Подход к построению высококачественных позиционно-силовых систем управления автономными необитаемыми подводными аппаратами с многостепенным манипулятором.....	104
28. Н.А. Красавин Метод позиционно-силового управления подводными аппаратами с многозвенными манипуляторами для выполнения контактных манипуляционных операций с подводными объектами.....	107
29. Р.П. Василенко, Н.А. Красавин Система стабилизации автономного необитаемого подводного аппарата с дополнительным движителем для компенсации динамических воздействий со стороны многозвенного манипулятора.....	110
30. Н.В. Кузнецов, М.Ю. Лобачев (приглашенный доклад) Анализ и синтез систем управления фазовой автоподстройки с приложением к задачам навигации и управления движением	113
31. А.В. Моторин, О.А. Степанов, В.А. Васильев Идентификация модели погрешностей навигационной системы счисления.....	115
32. Е.Г. Литуненко, А.М. Грузликов, Н.В. Колесов, Ю.М. Скородумов Моделирование информационных обменов в гидроакустической сети подводных аппаратов	121

33. А.И. Евстратенкова, Е.Н. Тенюшев, Н.А. Быкова, Е.В. Бабаев	
Разработка и сертификация программного обеспечения инерциальных навигационных систем с использованием модульного подхода на примере навигационной системы СНВ-1А	124
34. А.А. Проценко, А.В. Зувев, А.Н. Жирабок	
Метод построения адаптивных систем управления движителями подводных роботов для компенсации последствий появления парных дефектов.....	127
35. В.В. Прокопович, Г.А. Подшивалов, Л.А. Мартынова, И.В. Пашкевич, В.С. Быкова	
Оценка безопасности движения большого автономного необитаемого подводного аппарата.....	130
36. Д.А. Назаров	
Интеллектуальная система обеспечения параметрической надежности на основе функционально-параметрического подхода	134
37. В.С. Быкова, А.И. Машошин, А.А. Павлов	
Проблемы использования нейронных сетей для распознавания донных объектов	137
38. И.В. Улитин, М.А. Барулина, С.В. Окуньков	
Ансамблевые методы обработки черно-белых изображений для предиктивных навигационных систем	140

А.Ю. КРЕТОВ, П.Ю. КРЕТОВ, А.В. НЕКРАСОВ, Е.В. БАБАЕВ
(АО «Инерциальные технологии «Технокомплекса», Раменское)

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ АЗИМУТАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ

В настоящей работе предлагается рассмотреть возможность применения активной акустической системы для определения рассогласования азимута между двумя БИНС. Приводятся результаты математического моделирования алгоритмов работы системы

Введение. Решение задачи навигации для ряда объектов гражданского применения (сельское хозяйство, авто и железнодорожный транспорт, навигация в складских помещениях) требует знания начального курса. Для наземных систем низкой точности измерение курса часто заменяется измерением путевого угла, который определяется по СНС при движении. Более дорогие и точные системы используют измерения двухантенного спутникового компаса.

Альтернативным способом задания курса является использование акустических систем позиционирования (АСП), до недавнего времени широко применяющиеся в подводной навигации. В последнее десятилетие АСП получают применение в задачах навигации в помещениях и определения местоположения источника звука (в переносном и стационарном исполнениях).

Принцип действия подобных систем основан на анализе распространения акустических колебаний. Время прихода акустической волны от источника до микрофона пропорционально расстоянию между ними. Анализируя временные задержки прихода звука на микрофоны вычисляется положение источника методами трилатерации или триангуляции.

В АО «ИТТ» проводятся исследования по возможности использования акустических систем в задачах, связанных с инерциальной навигацией и ориентацией. В частности, система рассматривается для применения в наземных мобильных платформах, таких как автономные сельскохозяйственные тракторы и комбайны, грузовые платформы складских помещений, а также подводные автономные аппараты, требующие курсовой коррекции. Схема макета устройства приведена на рисунке 1. Система состоит из двух блоков: вычислитель МК1 и излучатели контрольных сигналов 3 образуют блок излучателей, МК2 и микрофоны 4 – блок приемников БП. Вычислитель МК2 оценивает рассогласование курсов ψ_{cor} между БИ и БП по наблюдаемым угловым размерам пар излучателей. Основные вычислительные аспекты – расчет разностей времен прихода контрольного сигнала на микрофоны и оценка рассогласования азимута по ним.

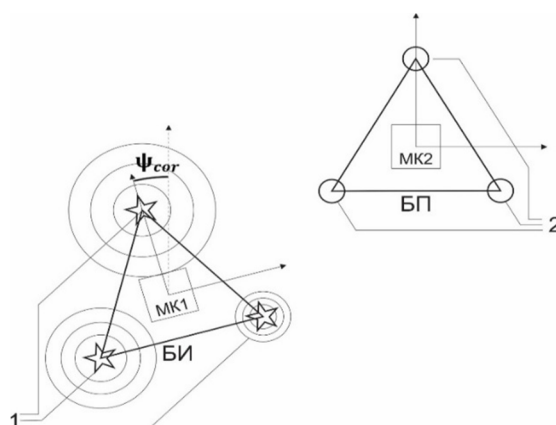


Рис. 1. Схема АСАК. 1 - излучатели контрольных сигналов, 2 - микрофоны

Оценка рассогласования в азимуте ψ_{cor} . Под углом азимутального рассогласования ψ_{cor} БИ и БП (рис. 2) понимается угол взаимной ориентации СвБПСК и СвБИСК. Угол вычисляется в два этапа:

- расчет угла ориентации БП β относительно опорной линии, проходящей через центры СвБПСК и СвБИСК;
- расчет азимута α на БП.

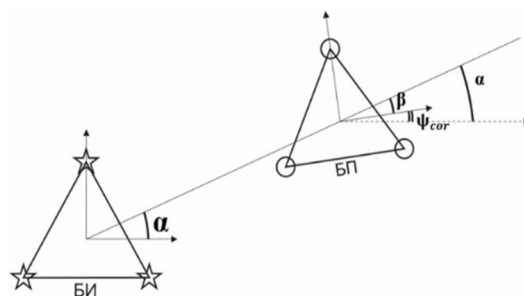


Рис. 2. β – угол между СвБПСК и опорной линией, α - азимут БП

Угол ψ_{cor} вычисляется через углы α и β по формуле:

$$\psi_{cor} = \beta - \alpha. \quad (1)$$

При постановке задачи предполагается, что источники звука являются точечными, а кривизной фронта акустической волны можно пренебречь. Такие допущения несущественно влияют на точность оценки, но значительно упрощают методику расчетов.



Рис. 3. Блок-схема этапов расчета ψ_{cor}

Алгоритм расчетов. Основные этапы вычислений представлены на рис. 3. Предполагается, что часы на БИ и БП синхронизированы. В блоке обработки звуковых сигналов выполняется регистрация контрольного сигнала, позволяющая сформировать массив временных меток $Tm(i,j)$, i – номер излучателя, j – микрофона. Определяются углы ориентации β_i БП вдоль фронта распространения акустической волны (рис. 4) от излучателей, позволяющие получить оценку угла β . Далее по угловым размерам сторон БИ находится угол α , по углам α и β вычисляется ψ_{cor} .

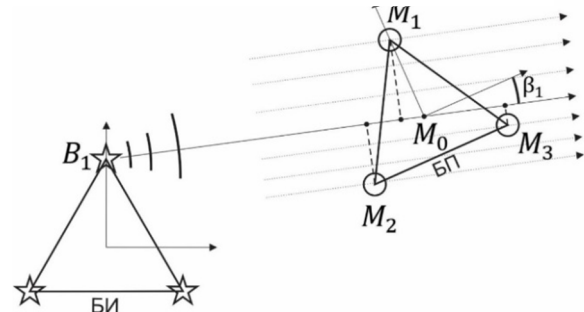


Рис. 4. Углы ориентации β_i БП вдоль фронта распространения акустической волны

Результаты моделирования. Для апробации методики оценки ψ_{cor} была разработана математическая модель распространения акустических сигналов от БИ, позволяющая получить массив $Tm(i,j)$, $i, j = 1, 2, 3$. В точные значения t_{ij} вводилась погрешность измерения e_t .

Графики ошибки определения угла в зависимости от расстояния и погрешности входных времен приведены на рис. 5.

Заключение. По итогам исследований были получены следующие результаты:

- разработана принципиальная схема активной акустической системы для определения рассогласования азимута между двумя БИНС;
- разработана математическая модель, с применением которой установлена связь погрешности определения ψ_{cor} с погрешностями основных измеряемых параметров;
- подтверждена целесообразность дальнейших исследований применения активной акустической системы для определения рассогласования азимута между двумя БИНС.

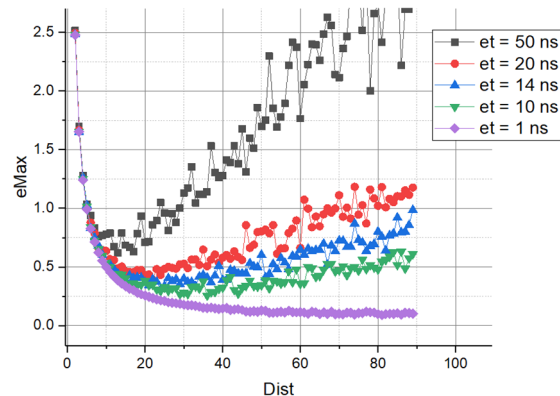


Рис. 5. Угловая ошибка в градусах, в зависимости от расстояния и погрешности e_t (в наносекундах)

ЛИТЕРАТУРА

1. Thyagaraju Damarla. Battlefield Acoustics. Springer, 2015.
2. Современные микрофоны. Теория, Проектирование, Вахитов Ш.Я., Санкт-Петербург, 2003
3. Теоретические основы радиолокации, под ред. Я.Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970. – 560 с

A.Yu. Kretov, P.Yu. Kretov, A.V. Nekrasov, E.V. Babaev (JSC "Inertial technologies of Technocomplex", Ramenskoye). **Prospects for practical application azimuth correction acoustic systems**

Abstract. In this paper, it is proposed to consider the possibility of using an active acoustic system to determine the azimuth mismatch between two SINS. The results of mathematical modeling of the algorithms of the system are presented.

С.Ю. ШЕВЧЕНКО, Д.А. МИХАЙЛЕНКО
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург)

ВЛИЯНИЕ ГАБАРИТОВ И ТОПОЛОГИИ ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА В ФОРМЕ КОЛЬЦА НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Работа посвящена влиянию изменения конструкции кольцевого резонатора и размеров чувствительного элемента проектируемого микромеханического акселерометра на поверхностных акустических волнах на амплитудно-частотную характеристику, полосу пропускания, чувствительность и прочностные характеристики. В работе демонстрируются различные конструкции встречно-штыревого преобразователя и оценивается влияние изменений на характеристики чувствительного элемента.

Введение. Микромеханические акселерометры (ММА) — это приборы, которые измеряют кажущееся ускорение.

На протяжении большей части XX века традиционные модели акселерометров были имели значительный вес и размеры, что затрудняло их использование в портативной технике. Однако по мере развития микроэлектронных технологий эти датчики значительно уменьшались в размерах. К сожалению, такая миниатюризация привела к снижению их точности и стабильности. Прочность конструкции значительно ограничена, что приводит к их разрушению при воздействии чрезмерного ускорения или внешних сил.

Одной из альтернатив, позволяющей преодолеть конструкционные ограничения микроэлектромеханических устройств (МЭМС), являются микромеханические датчики на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Данные датчики основываются на использовании пьезоэлектрического эффекта для генерации и обнаружения акустических волн, которые распространяются вдоль поверхности материала.

ММА на поверхностных акустических волнах, являясь монолитной твердотельной конструкцией, характеризуются относительно высокой стабильностью параметров и низким энергопотреблением. В текущий момент на рынке доступны датчики на ПАВ, которые широко используются в других областях – от медицинских технологий [2-5] и обеспечения безопасности до беспилотных систем, включая паро- и газоанализаторы [6-8], системы контроля температуры [9, 10], влажности [11], а также устройства для определения давления [12].

В последние годы были предложены конструкции чувствительных элементов (ЧЭ) ММА на ПАВ в виде прямоугольника и треугольника [13, 14]. Данные датчики значительно превосходят классические МЭМС акселерометры в прочностных характеристиках и стабильности работы [15]. В текущей работе предлагается изменение конструкции ЧЭ ММА, а именно – замена встречно-штыревого преобразователя на кольцевую форму, что теоретически позволит с помощью представленного ЧЭ выдерживать ускорения в десятки тысяч g. Мембранная форма позволяет равномерно распределять нагрузки по поверхности ЧЭ, чтобы преодолеть недостатки прямоугольных и треугольных ЧЭ в виде одностороннего закрепления консоли в корпусе устройства [16].

Цель работы. В предыдущих работах [1] авторами рассматривались частотные характеристики чувствительных элементов (ЧЭ) на поверхностных акустических волнах разрабатываемого микромеханического акселерометра (ММА) из различных материалов, их способы закрепления в корпусе и влияние внешних факторов на ЧЭ. На следующем этапе возникла необходимость оптимизации конструкции встречно-штыревого преобразователя (ВШП), чтобы сузить полосу пропускания и боковые моды и улучшить обнаружение сигнала, принимая во внимание типичные технологические ограничения. Кроме того, целью оптимизации конструкции и моделирования является проверка сохранения работоспособности при дефектах литографии, что является наиболее распространенной технологической ошибкой. Для этого предлагается изменение ВШП, приводящее к его частичной фрагментации. Также

необходимо исследовать зависимость чувствительности и максимального ускорения от габаритов чувствительного элемента.

Конструкция чувствительного элемента. Общий вид кольцевого чувствительного элемента представлен на рис. 1. Резонатор состоит из двух ВШП в форме кольца (2) и консоли из пьезоэлектрического материала, расположенной между преобразователями (1). Вся конструкция ограничена по глубине и по радиусу демпфирующей средой для подавления паразитных отражений волн от внешних границ. Общая схема ВШП с конусовидными электродами представлена на рис. 2. В работе используются следующие параметры ВШП: длина периода ВШП на внешнем крае апертуры составляет для ВШП с внутренним радиусом 1000 мкм – 19.2 мкм, с внутренним радиусом 2000 мкм – 38.4 мкм, с внутренним радиусом 3000 мкм – 57.6 мкм при угловом периоде преобразователя $\theta_p = 1^\circ$ и высоте $h = 0.2$ мкм

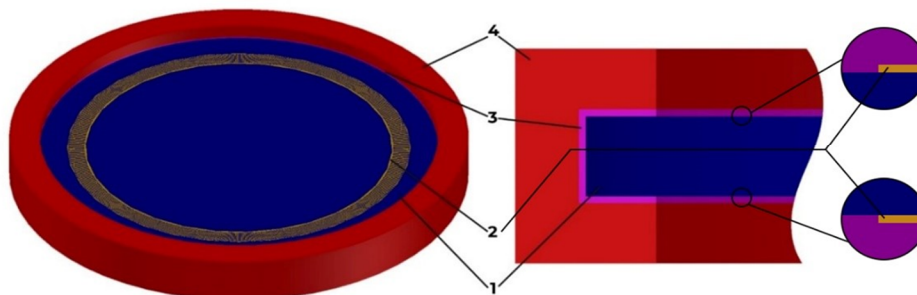


Рис. 1. Мембранный чувствительный элемент: 1: консоль; 2: встречно-штыревые преобразователи; 3: демпфирующий материал; 4: корпус.

Высота консоли, согласно техническим характеристикам пластин ниобата лития, используемых для изготовления экспериментальных образцов, равна 350 мкм. Радиус консоли составляет 1500 мкм для первой модели, 3000 мкм – для второй и 4500 мкм – для третьей модели. ВШП располагается на радиусе в 1000, 2000 и 3000 мкм от центра консоли для каждого варианта исполнения соответственно. Использование нескольких вариантов габаритных параметров ВШП и консоли обусловлено тем, что, при увеличении площади поверхности консоль будет меньше деформироваться и, соответственно, будет меньшая чувствительность у датчика. Одной из целей данной работы является нахождение оптимальных габаритов кольцевого резонатора с точки зрения чувствительности датчика. Габаритные параметры ЧЭ представлены в табл. 1.

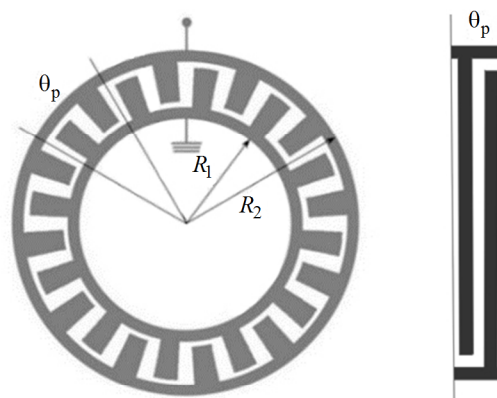


Рис. 2. Встречно-штыревой преобразователь с конусообразными электродами

Параметр	Значение		
	Внутренний радиус (R_1), мкм	1000	2000
Внешний радиус (R_2), мкм	1120	2240	3360
Апертура (W), мкм	12	24	36
Длина периода на внешней части апертуры ($\theta_{внеш}$), мкм	19.2	38.4	57.6
Угловой период (θ_p), ...°	1		
Высота ВШП (h), мкм	0.2		
Расположение ВШП на консоли (R_3), мкм	1000	2000	3000
Радиус консоли (R_0), мкм	1500	3000	4500
Высота консоли (h_0), мкм	350		

Геометрия штырей. Изначально конструкция предполагала конусообразные штыри ВШП, которые протяжением всей апертуры от внешнего края ВШП до внутреннего позволяли сохранять ширину штыря относительно длины волны как $\lambda/4$. В работе также были предложены прямоугольные штыри, которые на протяжении всей апертуры имели ширину 4,8 мкм ($\lambda/4$), что позволяло сохранить шаг в $\lambda/4$ на внешней части ВШП, а к внутренней части ВШП межштыревое расстояние сокращалось.

По результатам моделирования можно сказать, что прямоугольная геометрия штырей позволила получить увеличение реальной составляющей комплексной проводимости (real Y11) на 11%, полосу пропускания сократить на 37% до 107 кГц, и превышение основной моды над второй в 5 раз.

Частичная фрагментация. Вторая часть работы была связана анализом влияния на характеристики чувствительного элемента частичной фрагментации ВШП с прямоугольной геометрией, которая может возникать при литографии компонентов чувствительного элемента, а также за счет несовершенства технологического процесса изготовления кольцевого ВШП [10]. Согласно теории ПАВ, при отсутствии общей шины возникают условия для автогенерации волны в последующих участках ВШП

В работе было предложено 7 видов ВШП с частичной фрагментацией: 3 из них имели общую шину, а 4 – нет. Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод о том, что частичная фрагментация ухудшает характеристики чувствительного элемента: значения реальной составляющей комплексной проводимости и отношение первой моды ко второй уменьшались пропорционально количеству отсутствующих штырей. Некоторые предложенные конструкции показали равенство мод. Конструкции ВШП с наличием общей шины показали лучшие результаты по отношению к таким же конструкциям без общей шины, из чего можно сделать вывод о том, что общая шина позволяет сохранить ПАВ в апертуре ВШП.

Компьютерное моделирование. На первом этапе работы требуется определить частотные характеристики для моделей с внутренним радиусом ВШП 1000, 2000 и 3000 мкм для последующего сравнения полученных данных с экспериментальными образцами. На рис. 3–5 представлены частотные характеристики для различных видов исполнения ЧЭ.

Как видно из рис. 3–5 графики частотных характеристик образцов имеют одинаковый вид, а частота резонанса смещена вследствие изменения длины периода ВШП. Частота резонанса для первого образца составляет 207.99 МГц, для второго – 104.10 МГц и 68.99 МГц – для третьего.

Следующим этапом работы является определение предельно допустимого ускорения и чувствительность каждой модели.

Исходя из полученных данных (рис. 6 и 7) можно сделать вывод о том, что при одинаковой высоте консоли чувствительность датчика будет расти при увеличении радиуса консоли. Зависимость чувствительности от соотношения радиуса консоли к ее высоте можно представить в виде графика (рис. 8).

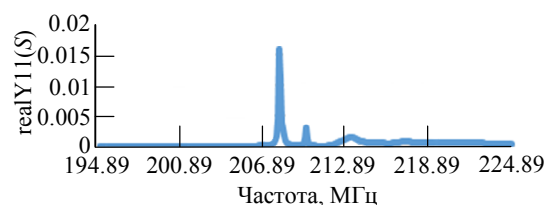


Рис. 3. Реальная составляющая комплексной проводимости для ВШП с внутренним радиусом 1000 мкм.

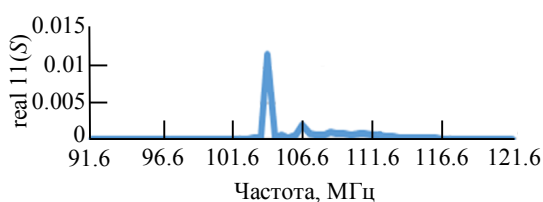


Рис. 4. Реальная составляющая комплексной проводимости для ВШП с внутренним радиусом 2000 мкм

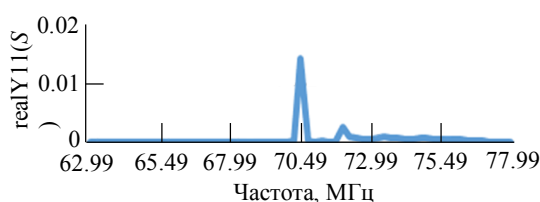


Рис. 5. Реальная составляющая комплексной проводимости для ВШП с внутренним радиусом 3000 мкм

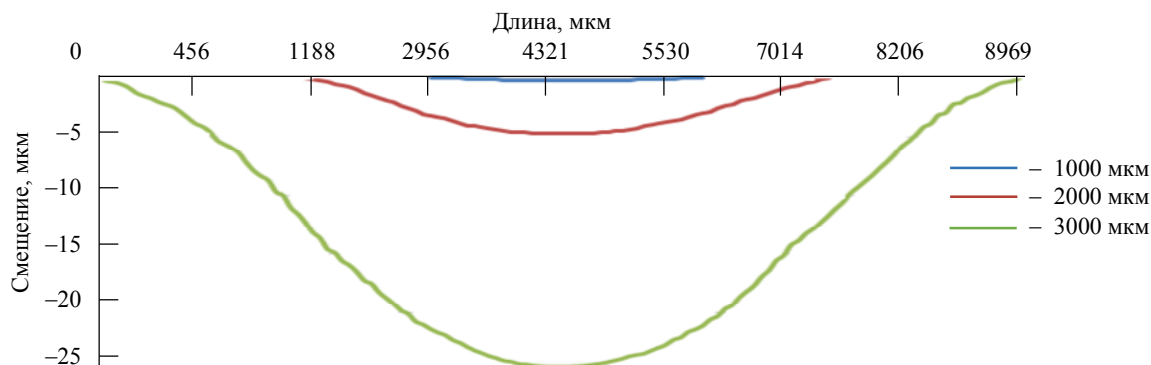


Рис. 6. График распределения нагрузки по диаметральному срезу консоли при ускорении в 40000g

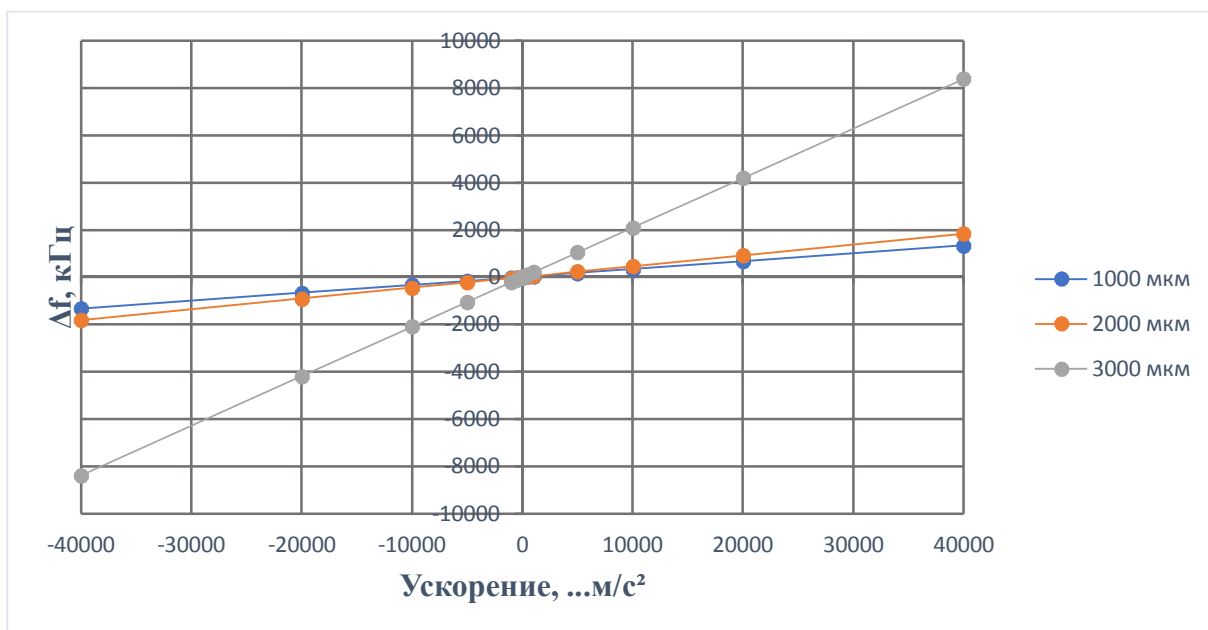


Рис. 7. График изменения частоты от ускорения

Максимально испытываемое ускорение для консоли с радиусом 1500 мкм составляет 191132g, для радиуса 3000 мкм – 84958g и для радиуса 4500 мкм – 37514g соответственно. Ускорение, которое способна выдержать консоль, зависит от соотношения радиуса консоли к ее высоте и данную зависимость возможно также представить в виде графика (рис. 9).

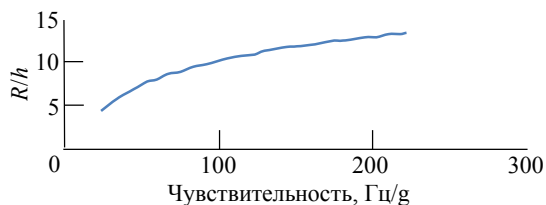


Рис. 8. График зависимости чувствительности от соотношения радиуса консоли к ее высоте

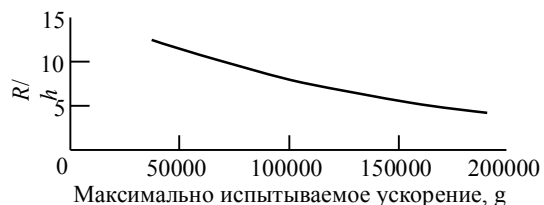


Рис. 9. График зависимости максимального ускорения от соотношения радиуса консоли к ее высоте

Заключение. Наиболее эффективной геометрией кольцевого резонатора на ПАВ является ВШП с прямоугольными штырями, но конусообразные штыри также могут использоваться для создания чувствительного элемента.

Сужение периодов в сторону внутренней части конструкции улучшает частотные характеристики кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах, а именно позволяет:

- увеличить отношение максимальных значений первой моды ко второй;
- уменьшить полосу пропускания.

Сохранение работоспособности резонатора может быть осуществлено удалением не более одной пары ВШП в 10 и более периодов. При этом частичная фрагментация ВШП должна быть равномерной. При увеличении числа исключенных штырей геометрия кольцевого резонатора нарушается, и волна выходит из заданного геометрией положения.

Наличие общей шины позволяет удерживать поверхностную акустическую волну внутри структуры ВШП.

Чувствительность и максимальное выдерживаемое ускорение ЧЭ кольцевого резонатора на ПАВ прямо зависит от соотношения радиуса консоли к ее высоте, причем чем выше чувствительность – тем ниже максимальное выдерживаемое ускорение. Для каждого материала данные зависимости являются уникальными.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ «Развитие теории акустических колебаний для оценки параметров движения подвижных объектов» (23-79-10259)

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко С.Ю., Михайленко Д.А., Лукьянов Д.П. Выбор материала чувствительных элементов акселерометров на основе ПАВ // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23. – №. 6. – С. 70-83
2. Chen X., Wang M., Zhao G. Point-of-care assessment of hemostasis with a love-mode surface acoustic wave sensor // ACS sensors. – 2020. – Т. 5. – №. 1. – С. 282-291.
3. Abedini-Nassab R., Emami S. M., Nowghabi A. N. Nanotechnology and acoustics in medicine and biology // Recent Patents on Nanotechnology. – 2022. – Т. 16. – №. 3. – С. 198-206.
4. Kumar M., Bhadu D. Design performance and frequency response analysis of SAW-based sensor for dichloromethane gas sensing amidst the COVID-19 // Journal of Vibration Engineering & Technologies. – 2021. – Т. 9. – С. 725-732.
5. Jeng M. J. et al. Surface acoustic wave sensor for c-reactive protein detection // Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 22. – С. 6640.
6. Wang W. et al. Development of a Pd/Cu nanowires coated SAW hydrogen gas sensor with fast response and recovery // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2019. – Т. 287. – С. 157-164.
7. Pan Y. et al. Interface and Sensitive Characteristics of the Viscoelastic Film Used in a Surface Acoustic Wave Gas Sensor // ACS sensors. – 2022. – Т. 7. – №. 2. – С. 612-621.
8. Li M. et al. Colloidal quantum dot-based surface acoustic wave sensors for NO₂-sensing behavior // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2019. – Т. 287. – С. 241-249.
9. Zhou X. et al. Novel multilayer SAW temperature sensor for ultra-high temperature environments // Micromachines. – 2021. – Т. 12. – №. 6. – С. 643.
10. Weng H. et al. High Temperature SAW Sensors on LiNbO₃ Substrate With SiO₂ Passivation Layer // IEEE Sensors Journal. – 2019. – Т. 19. – №. 24. – С. 11814-11818.
11. Alam S., Islam T., Mittal U. A sensitive inexpensive SAW sensor for wide range humidity measurement // IEEE Sensors Journal. – 2019. – Т. 20. – №. 1. – С. 546-551.
12. Li Y. et al. Surface acoustic wave pressure sensor and its matched antenna design // Measurement and Control. – 2019. – Т. 52. – №. 7-8. – С. 947-954.
13. Lukyanov D.P. et al. Microaccelerometer based on surface acoustic waves // Proceedings of the 2014 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications. – IEEE, 2014. – С. 18-21.
14. Shevchenko S.Yu. et al. Surface-acoustic-wave sensor design for acceleration measurement // Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 7. – С. 2301.
15. Дворников А.А., Огурцов В.И., Уткин Г.М. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах. - М.: Радио и связь, 1983. - 137 с.
16. Shevchenko S.Yu., Khivrich M.A., Markelov O.A. Ring-shaped sensitive element design for acceleration measurements: Overcoming the limitations of angular-shaped sensors // Electronics. – 2019. – Т. 8. – №. 2. – С. 141.

S.Yu. Shevchenko, D.A. Mikhailenko (St. Petersburg Electrotechnical University LETI, Russia). **The influence of dimensions and topology of interdigitated transducers on the characteristics of a ring-shaped saw sensing element**

Abstract. The paper discusses how the modification of ring resonator design and dimensions of the sensing element of the designed MEMS accelerometer on surface acoustic waves affect its amplitude-frequency response, bandwidth, sensitivity, and stability. Different designs of interdigitated transducer are demonstrated, and the influence of modifications on the sensing element characteristics is estimated.

Е. А. ЯКУШИНА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА НАКЛОНОМЕРА НА БАЗЕ МАЯТНИКОВОГО КОМПЕНСАЦИОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С АВТОКОМПЕНСАЦИЕЙ

Исследуются характеристики макетного образца наклономера на базе маятникового компенсационного акселерометра с автокомпенсацией. Представлены результаты испытаний макетного образца, а также предложены решения по улучшению точностных характеристик наклономера.

Введение. Рост требований к чувствительным элементам инерциальных навигационных систем (ИНС)[3] ведёт к тому, что уже сегодня необходимая точность, предъявляемая к чувствительным элементам, достигает одной угловой секунды. Однако стенды, на которых проходит калибровка, не всегда могут обеспечить необходимую точность. Использование фундамента, не связанного с фундаментом здания, позволяет минимизировать «движение» основания. Следует учесть, что суточные изменения наклона поверхности составляют 1-2 угловых секунды, сезонные изменения – 5-7 угловых секунд. Эти значения оказывают эффект на нестабильность показаний прибора при длительных испытаниях. Использование наклономера позволит определить изменение наклона поверхности при длительных испытаниях и учесть это изменение при последующем анализе полученных данных. Настоящая работа посвящена исследованию характеристик макетного образца наклономера на базе маятникового компенсационного акселерометра (АКМ) для проведения лабораторных испытаний.

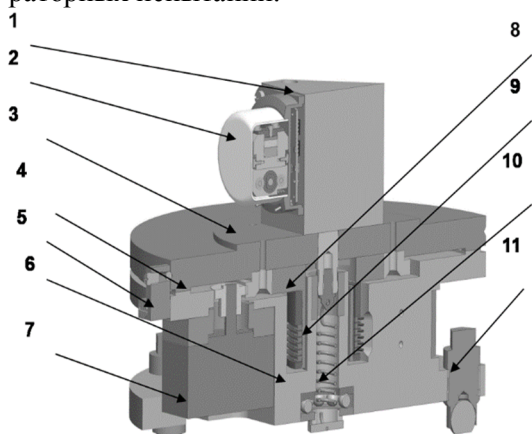


Рис. 1. Конструкция наклономера:

- 1 – базовый кронштейн; 2 – акселерометры;
- 3 – поворотная платформа; 4 – базовая плоскость
- 5 – фиксатор; 6 – основание; 7 – шаговый двигатель;
- 8 – шестерня передачи вращения;
- 9 – токосъемники; 10 – натяжное устройство;
- 11 – регулировочные винты

Конструкция наклономера. В предлагаемой конструкции наклономера[2] можно выделить три основных составляющих: поворотная платформа, акселерометры и плата управления (рисунок 1). Акселерометры являются чувствительным элементом наклономера, поворотная платформа позволяет осуществлять измерения с помощью акселерометра по двум ортогональным направлениям, и, кроме того, даёт возможность компенсировать смещение "нуля" акселерометра.

Принцип компенсации. Поворотная платформа, движение которой осуществляется шаговым двигателем, совершает реверсивное движение, позволяя провести измерения в двух противоположных точках (0° - 180°) [1]. Значения, полученные в этих точках, позволяют оценить смещение нуля ЧЭ, как основную погрешность акселерометров, а также определить абсолютное отклонение поверхности, вызванное температурными и другими воздействиями.

Отклонение поверхности определяется из формулы:

$$\alpha = (a_0 - a_{180}) / 2, \quad (1)$$

Значение смещения нуля сигнала ЧЭ наклономера, возникшее при измерении:

$$\lambda = (a_0 + a_{180}) / 2, \quad (2)$$

где a_0 и a_{180} – значения измеренных углов отклонения поверхности в двух противоположных точках 0° и 180° .

Результаты испытаний: Был изготовлен макетный образец, содержащий два ЧЭ с ортогональными осями чувствительности. В первую очередь, необходимо было оценить точность работы привода или насколько будут отличаться значения показаний акселерометра в одинаковых положениях поворотной платформы. Для этого после выставки наклономера в горизонт, в каждом положении измерения (0° , 90° , 180° , 270° , 180° , 90° , 0°), был определён угол наклона поверхности

(таблица 1). В этом и последующих испытаниях используются два акселерометра – ПР2 (с диапазоном измерения 5g) и ПР11 (с диапазоном измерения 0,1g), что позволяет проводить измерения по двум осям одновременно и получить более чувствительный прибор (здесь и далее ПР обозначение исследуемых акселерометров). Различие измеренных углов ПР2 и ПР11 объясняется наличием начальных углов невыставки, значения этих углов по двум осям различны.

Таблица 1

Результаты расчетов измеренного наклона АКМ 2 и АКМ 11 при вращении поворотной платформы		
Угол поворота платформы	Оси X, угл. с. (ПР2)	Ось Y, угл. с. (ПР11)
0-180 прям. вр.	3,5	0,348
90-270 прям. вр.	0,5	3,386
90-270 обр. вр.	0,5	3,769
0-180 обр. вр.	4	0,661

Погрешность измерения угла наклона по оси X составляет 0,5", определяется диапазоном измерения прибора. Погрешность измерения наклона по оси Y в одинаковых положениях не превышает 0,4". Максимальная разница в измерении угла наклона по одной оси двумя разными приборами не превышает 0,8".

На большом интервале времени работы наклономера, существует температурная зависимость от изменений температуры окружающей среды. Нестабильность измерения наклона в длительном пуске составляет около $\pm 1''$ по оси X, по оси Y – $\pm 2''$ при изменении температуры. В данном случае, нестабильность показаний вызвана изменением наклона базовой поверхности, а также влиянием температуры. Для исключения температурной зависимости на изменение наклона поверхности на длительных пусках необходимо обеспечить термостатирование наклономера или ввести алгоритмическую термокомпенсацию.

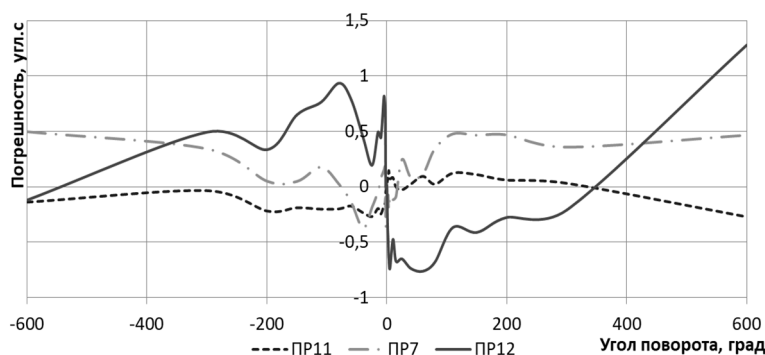


Рис. 2. Погрешность измерения угла наклона в положениях поворотной платформы 0°, 180° в диапазоне $\pm 600''$

Так как основная задача наклономера – учет наклонов базовых лабораторных фундаментов, то достаточно диапазона работы наклономера $\pm 600''$. Поэтому также была проведена оценка погрешности измерения наклона в таком рабочем диапазоне. На рисунке 2 представлено изменение погрешности измерения наклона в диапазоне $\pm 600''$ для трех акселерометров, различающихся диапазоном измерений: ПР11 – 0,1g, ПР7 и ПР12 – 5g. Измерение проводилось на поворотном столе.

Максимальное значение погрешности для ЧЭ с меньшим диапазоном измерений не превышает $\pm 0,2''$ (ПР11) с учётом погрешностей стенда. При переходе через 0 все приборы существенно изменили свои показания, что может подтверждать ошибки задания углов наклона плиты. Точность прибора № 11 вполне удовлетворяет требованиям наклономера.

Заключение. Проведенные испытания подтвердили перспективность использования разрабатываемого макета наклономера на базе маятниковых акселерометров компенсационного типа проведения для калибровки и стендовых испытаний прецизионных навигационных ЧЭ. Была выявлена температурная зависимость выходных сигналов акселерометров, которая может быть существенно снижена путем термостатирования наклономера или введения алгоритмической термокомпенсации. Акселерометр с меньшим диапазоном измерения ускорений позволяет достигать погрешности измерений наклона с точностью 0,5". Следует продолжить испытания на стабильность в длительном режиме с двумя узкодиапазонными акселерометрами при установке термостабилизированного кожуха на акселерометры, а также провести более тщательные исследования стабильности углов наклона платформы на различных углах при постоянной и переменной температуре окружающей среды, а также исследовать возможность использования одного акселерометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zeromatic dual-axis inclination sensor. [Электронный ресурс] URL: <http://Wylarag.com> (дата обращения 19.09.2022)
2. **Варганова Л. Г.** Компенсационный маятниковый акселерометр, 2 559 641 С2, март 27, 2015.
3. **Матвеев В.В.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. Санкт-Петербург: ГНЦ РФ ОАО "Концерн" ЦНИИ "Электроприбор", 2009. 280 с.

E. A. Yakushina (CSRI Electropribor, Saint-Petersburg). **Development and tests of an inclinometer prototype based on compensating pendulum accelerometer with autocompensation.**

Abstract. Development of navigation sensors leads to rise of accuracy. However the control equipment is not accurate enough. Usage of inclinometer helps to verify the movements of basis during long-time test. This work is devoted to develop and control of inclinometer prototype based on the pendulum compensating accelerometer with autocompensation of zero drift.

Р. А. РОМАНОВ, М. А. БАРУЛИНА

(Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов,
Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь)**ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЭМС/НЭМС ДАТЧИКОВ**

В работе рассматриваются проблемы построения математических моделей динамической деформации планарных чувствительных элементов МЭМС/НЭМС датчиков с использованием нелокальных теорий деформации. Нелокальные теории деформации позволяют исследовать напряженно-деформированное состояние компонентов МЭМС/НЭМС датчиков имеющих размеры 100–2000 нм. При таких размерах нарушается гипотеза сплошности среды, что делает затруднительным применение классических теорий сплошной среды. В работе была построена корректная математическая модель деформации планарного чувствительного элемента. Чувствительный элемент был представлен в виде тонкой однородной размерно-зависимой пластины под действием сложной распределенной нагрузки. В качестве теории деформации была использована нелокальная теория градиентов, кинематические соотношения были сформулированы на основе теории деформации пластин третьего порядка. Полученные уравнения полностью корректные и могут использоваться для дальнейшего анализа динамики размерно-зависимых планарных чувствительных элементов различных датчиков.

Введение. Одной из проблем моделирования наноразмерных планарных чувствительных элементов является отсутствие адекватных математических моделей для описания их динамической деформации. Для объектов, эффективные размеры которых лежат в пределах от 100 до 2000 нм, нарушается основная гипотеза о сплошности среды, поэтому классические теории упругости в данном случае неприменимы. В последнее время были разработаны различные нелокальные теории упругости, но применение большинства из них приводит или к нарушению фундаментального принципа симметрии, или имеет большое количество неопределимых параметров. Первое приводит к некорректным уравнениям деформации, второе делает невозможным практическое применение таких теорий.

Целью данной работы было создание математической модели, описывающей нелинейные деформации планарного наноразмерного чувствительного элемента на основе нелокальной градиентной теории, включающей в себя только два размернозависимых параметра.

Математическая модель. Рассмотрим изотропную тонкую пластину с постоянной толщиной h (рис. 1) и плотностью ρ_0 . Возмущающая сила приложена на поверхность $x_3 = -h/2$. Координатная система показана на рис. 1.

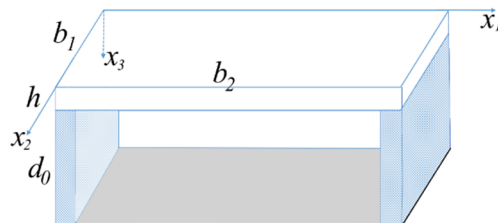


Рис. 1. Планарный компонент нанодатчика

Выражения для поля перемещений (u_1, u_2, u_3) в соответствии с теорией деформации пластин 3го порядка имеет вид [1]:

$$u = u_0 + x_3 \phi - c x_3^3 (\phi + w)$$

где $u = u(t, x_1, x_2, x_3)$ вектор перемещения точки, ϕ – вектор поворота, $w = (u_{3,1}^0, u_{3,2}^0, 0)^T$, $c = 4/(3h^2)$.

Общая корректная нелокальная градиентная теория для изотропного тела может быть записана в виде [2]:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= \lambda\theta\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij} \\ \mu_{ijk} &= a_1(\Delta u_k\delta_{ij} + \Delta u_j\delta_{ik} + \theta_{,i}\delta_{jk}) + 2a_2(\theta_{,k}\delta_{ij} + \theta_{,j}\delta_{ik}) + a_7\Delta u_i\delta_{jk} + 2a_8u_{i,jk} + \\ &+ 2a_{11}(u_{j,ik} + u_{k,ij})\end{aligned}$$

где λ , μ коэффициенты Ламэ; $\sigma_{ij} = C_{ijkl}u_{k,l} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl}$ тензор напряжений; a_i некие положительные константы, которые используются при определении тензора градиентных модулей $A = A_{ijklm}$; $\mu_{ijk} = A_{ijklm}u_{l,mn} = A_{ijklm}\varepsilon_{lm,n}$ – тензор градиентов. Константы a_i могут рассматриваться как размерно-зависимые параметры.

Условия симметрии имеют вид:

$$u_{i,jk} = u_{i,kj}, \mu_{ijk} = \mu_{ikj} = \mu_{kij}$$

Используя принцип виртуальных перемещений, после интегрирования по частям, перехода в уравнениях к перемещениям, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}A_1(u_1, u_2) + H_1(u_1, u_2) &= I_0\ddot{u}_1 \\ A_2(u_1, u_2) + H_2(u_1, u_2) &= I_0\ddot{u}_2 \\ A_3(u_3, \phi_1, \phi_2) + H_3(u_3, \phi_1, \phi_2) &= F_{dr} + I_0\ddot{u}_3 + cJ_4(\ddot{\phi}_{1,1} + \ddot{\phi}_{2,2}) - c^2I_6(\ddot{u}_{3,11} + \ddot{u}_{3,22}) \\ A_4(u_3, \phi_1, \phi_2) + H_4(u_3, \phi_1, \phi_2) &= J_1^2\ddot{\phi}_1 - cJ_4\ddot{u}_{3,1} \\ A_5(u_3, \phi_1, \phi_2) + H_5(u_3, \phi_1, \phi_2) &= J_1^2\ddot{\phi}_2 - cJ_4\ddot{u}_{3,2}\end{aligned}$$

В полученной системе A_i – классические части уравнений, которые получаются при обнулении размерно-зависимых параметров. H_i – неклассические части уравнений, учитывающие размерно-зависимые параметры. Выражения для H_i имеют сложный вид, поэтому не приводятся в тезисах.

Как видно, система уравнений распадается фактически на две части. Первые два уравнения представляют собой перемещения в плоскости пластины. Остальные три уравнения – уравнения, описывающие изгибные деформации.

Заключение. В работе построена математическая модель динамической деформации наноразмерного планарного чувствительного элемента. Чувствительный элемент рассматривался в виде тонкой однородной размерно-зависимой пластины, находящейся под действием сложной распределенной нагрузки. В качестве теории деформации была использована нелокальная теория градиентов, кинематические соотношения были сформулированы на основе теории деформации пластин третьего порядка. Полученная система уравнений, как и ожидалось, распалась на две независимые системы, одна из которых описывает перемещения в плоскости пластины, вторая – изгибные деформации. Соответственно при дальнейшем анализе это приведет к упрощению анализа полученных уравнений, например, на устойчивость и возможность возникновения детерминированного хаоса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **A. Gusev, S. Lurie.** Symmetry conditions in strain gradient elasticity. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 2017, 22(4), pp. 683–691.
2. **J. Reddy,** *Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and analysis*, CRC, 2004

R. A. Romanov, M. A. Barulina, (Saratov State University named after Chernyshevsky N.G., Institute of P Precision Mechanics and Control RAS, Perm State University). **Mathematical model of dynamic deformation of a nanosensor planar sensing element**

Abstract. A mathematical model of dynamic deformation of a planar sensing element of a nanomicroelectromechanical sensor is constructed. The sensing element was presented in the form of a thin homogeneous dimension-dependent plate under the action of a complex distributed load. The nonlocal theory of gradients was used as the theory of deformation, kinematic relations were formulated on the basis of the theory of deformation of plates of the third order. The obtained equations are completely correct and can be used for further analysis of the dynamics of dimension-dependent planar sensing elements of various sensors.

УДК 681.78

А. С. ЗАВИТАЕВ, М. И. ЕВСТИФЕЕВ
(Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО ГИРОСКОПА

В работе рассматриваются инструментальные погрешности ядерного магнитного гироскопа. Исследуется взаимосвязь изменений функциональных параметров в основных системах гироскопа с его инструментальными погрешностями.

Введение. В настоящее время существует потребность в разработке малогабаритных систем навигации высокودинамичных объектов. Для их создания необходимы гироскопы, которые превосходят микромеханические по точности и волоконно-оптические по виброустойчивости и массогабаритным характеристикам [1]. Исходя из этих требований, а также в связи с появлением новых технологий и методов наблюдения эффекта ядерного магнитного резонанса (ЯМР), возрос интерес к гироскопам, основанным на данном эффекте.

Ядерный магнитный гироскоп (ЯМГ) – квантовый гироскоп, чувствительным элементом которого является ячейка с ансамблем ориентированных атомных ядер, обладающим макроскопическим магнитным моментом (рис. 1).



Рисунок 1 Конструкция ЯМГ

Принцип действия ЯМГ основан на зависимости частоты прецессии макроскопического магнитного момента ядер в постоянном магнитном поле от угловой скорости вращения основания [1,2]. Для достижения точностных показателей ЯМГ на уровне тактической точности [3] необходимо реализовать размещение ансамбль атомов в среде, соответствующей множеству технических требований. Обеспечение каждого из этих требований достигается путем применения специально разработанных систем, которые в ЯМГ можно условно разделить на 3 группы:

- магнитная система;
- система термостатирования;
- оптическая система.

В работе рассматриваются инструментальные погрешности ЯМГ, вызванные технологическими несовершенствами реализации указанных систем. Исследуется взаимосвязь изменений функциональных параметров в основных системах гироскопа с его инструментальными погрешностями.

Инструментальные погрешности магнитной системы. Изменения функциональных параметров магнитной системы приводят к возникновению инструментальных погрешностей.

Основными функциональными параметрами магнитной системы являются параметры магнитного поля, создаваемого ей. Для обеспечения требуемой точности гироскопа необходимо создать экранирование от внешних магнитных полей, а также сформировать внутреннее магнитное поле с минимальным значением градиента (порядка 10 нТл) и стабильным постоянным значением магнитной индукции (20 мкТл) [4]. Для достижения таких функциональных параметров используется 5-ти слойный экран из пермаллоя и система катушек, представляющая собой систему колец Баркера (рис. 1).

Время релаксации атомов в газовой ячейке оптической системы зависит от возникающих градиентов магнитного поля в соответствии со следующим выражением [5, 6]:

$$T_{\Delta B} = \frac{8R^4\gamma^2}{175D} \left(\frac{\delta B_z}{\delta z} \right)^2, \quad (1)$$

где $T_{\Delta B}$ – время релаксации атомов; R – размер ячейки; γ – гиромагнитное отношение; D – коэффициент диффузии; $\frac{\delta B_z}{\delta z}$ – градиент магнитного поля.

Согласно статье [5], итоговое время релаксации рассчитывается следующим образом:

$$\frac{1}{T} = \Gamma_{total} = \Gamma_{coll} + \Gamma_{wall} + \frac{1}{T_{\Delta B}}. \quad (2)$$

Здесь Γ_{coll} и Γ_{wall} описывают релаксацию, возникающую вследствие соударений атомов и их ударов об стенки ячейки. Коэффициент D рассчитывается согласно следующей формуле [6]:

$$D = \frac{0.0101T^{1.75} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{P \left[(\sum v_A)^{\frac{1}{3}} + (\sum v_B)^{\frac{1}{3}} \right]^2}, \quad (3)$$

где P – общее давление двух газов (ксенона и азота); T – температура внутри ячейки; M_A и M_B – молекулярные веса двух газов; $\sum v_A$ и $\sum v_B$ – объем молекулярной диффузии.

В ячейке находится смесь газов из двух изотопов ксенона и буферного газа азота. В этом случае суммарный коэффициент диффузии может быть получен из выражения [6]:

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_{Xe-N_2}} \frac{P_{N_2}}{P_{total}} + \frac{1}{D_{Xe_{129}-Xe_{131}}} \frac{P_{Xe_{131}}}{P_{total}}. \quad (4)$$

где P_{N_2} , $P_{Xe_{131}}$ – давления каждого из газов в ячейке по отдельности, а P_{total} общее давление всех газов в ячейке. D_{Xe-N_2} и $D_{Xe_{129}-Xe_{131}}$ рассчитываются согласно формуле (3).

Независящий от магнитного поля выходной сигнал гироскопа может быть получен преобразованием:

$$\Omega = \frac{\gamma_{131}\omega_{129} - \gamma_{129}\omega_{131}}{\gamma_{131} - \gamma_{129}}, \quad (5)$$

где γ_{131} , γ_{129} – гиромагнитные отношения изотопов Хе, а ω_{129} , ω_{131} – их частоты прецессии.

Исходя из того, что сигналы изотопов Хе некоррелированы, среднее квадратичное отклонение может быть получено в виде функции от дисперсий сигнала Хе₁₂₉ и Хе₁₃₁ [6]:

$$\sigma_{\text{ЯМГ}} = 2430 \sqrt{\left(\frac{\gamma_{129}}{\gamma_{131} - \gamma_{129}} \right)^2 \sigma(\omega_{131})^2 + \left(\frac{\gamma_{131}}{\gamma_{131} - \gamma_{129}} \right)^2 \sigma(\omega_{129})^2}, \quad (6)$$

где $\sigma(\omega_{129}) = \frac{1}{T_{129} SNR}$. T_{129} рассчитывается согласно уравнению (2), $SNR \approx \frac{1}{\sigma_{ph}} \frac{\zeta B_{Xe} \varphi}{\sqrt{1 + \frac{T_1}{T_2} \varphi^2}}$ [6], где

σ_{ph} – амплитуда шума фотодиода; ζ – масштабный коэффициент; φ – угол магнитного момента; B_{Xe} – магнитное поле, создаваемое ксеноном; T_1 и T_2 – продольное и поперечное время релаксации соответственно; коэффициент 2430 необходим для получения размерности $^\circ/\sqrt{ч}$.

Из уравнений (1–6) видно, что из-за изменения такого функционального параметра, как градиент магнитного поля, уменьшается время релаксации атомов [7]. При уменьшении времени релаксации атомов ксенона падает предельная чувствительность гироскопа и, соответственно, снижается его точность, что является составляющей инструментальной погрешности.

В работе показано [8], что возникновение градиентов магнитного поля в магнитной системе обусловлено изменением взаимного положения ее элементов, изменением формы экранов, нестабильностью токов в системе катушек и пр. Определено, что изменение взаимного положения катушек приводит к изменению градиента с коэффициентом 0.89 нТл/мкм. Изменения положения обусловлены погрешностями технологического изготовления и смещением элементов во время эксплуатации под действием инерционных ускорений.

Инструментальные погрешности системы термостабилизации. Основными функциональными параметрами, влияющими на инструментальные погрешности, системы термостабилизации являются показатели температуры и их стабильность во времени эксплуатации. Для достижения оптимального распределения газов по объему ячейки, необходимо выдерживать температуру $\sim 90^\circ\text{C}$ [4], вследствие чего возникает необходимость термоизолировать ячейку от других элементов конструкции. Это связано как с деформациями, возникающими при прогреве корпуса прибора, так и со снижением мощности излучения лазеров при нагреве [9]. При этом должен быть обеспечен минимальный градиент температур как внутри ячейки ($\sim 0.05^\circ\text{C}$), так и по всему объему гироскопа ($\sim 1^\circ\text{C}$) [4].

Технологические погрешности изготовления как элементов измерения температур, так и элементов нагрева системы термостабилизации приводят к нарушению требуемых показателей температур и, соответственно, к изменению коэффициентов диффузии цезия и ксенона и к изменению скоростей релаксации на стенках ячейки. Это изменяет значение Γ_{wall} в уравнении (2), что в свою очередь, приводит к изменению соотношению сигнал-шум при измерении частоты прецессии ксенона, снижая потенциальную точность ЯМГ. При падении общей температуры ячейки падает концентрация металла в газовой смеси, что снижает скорость спин-обменной накачки и нарушает поляризацию ксенона, что также уменьшает точность гироскопа. Таким образом изменение функциональных параметров в системе термостабилизации приводит к возникновению инструментальных погрешностей. В работе [10] рассматривается влияние нестабильности температуры на точностные показатели. Дрейф гироскопа, обусловленный влиянием температуры, определяется при помощи коэффициента, $\Delta K = \frac{9.07}{100} \frac{^\circ/\text{ч}}{^\circ\text{C}}$. Основываясь на нем можно сделать вывод, что в случае нестабильности температур внутри ячейки на уровне 0.05°C , дрейф составит $4,5 \times 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{ч}$.

Кроме точностных показателей, система термостабилизации оказывает влияние такие характеристики гироскопа как время готовности, энергопотребление, габариты и стоимость. Достижение указанных показателей системы термостабилизации представляет собой сложную научно-техническую проблему.

Инструментальные погрешности оптической системы. В оптическую систему входят газовая ячейка и лазеры детектирования и накачки. Основным функциональным параметром, влияющим на инструментальные погрешности, является мощность излучения лазеров, которое сообщается ансамблю атомов внутри ячейки. Для достижения необходимой точности ЯМГ необходимо обеспечить расхождение лазерных лучей на уровне не более 2° , при этом деполяризация лучей при прохождении через ячейку не должна превышать 5% [4], что требует обес-

печения параллельности стенок ячейки [11]. Отдельной технологической особенностью является необходимость контроля газовой смеси в изготовленных ячейках в процессе изготовления [12]. При этом следует учитывать, что мощность излучения лазера накачки, сообщаемая ансамблю атомов, должна быть не менее 1 мВт.

Соотношение давлений газов в ячейке тоже является функциональным параметром и влияет на скорости релаксаций цезия и ксенона, а также на эффективность поляризации ксенона. Это приводит, как и в случае с системой термостатирования, к ухудшению предельной чувствительности ЯМГ. В случае невыполнения требований по интенсивности оптической накачки изменяется скорость релаксации металла, что приводит к увеличению собственных шумов гироскопа, что в конечном итоге снижает общую точность ЯМГ, вызывая инструментальную погрешность.

Следует отметить взаимное влияние параметров системы термостабилизации и оптической системы, что приводит к необходимости комплексного решения технологических задач при реализации этих систем и учета возникающих погрешностей.

Заключение. В работе проведено исследование основных инструментальных погрешностей ядерного магнитного гироскопа. Рассмотрено влияние трех основных систем – магнитной системы, оптической системы и системы термостатирования. Выявлены взаимосвязи вариаций функциональных параметров подсистем гироскопа и его инструментальных погрешностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Литманович Ю.А., Вершовский А.К., Пешехонов В.Г.** Гироскоп на основе явления ядерного магнитного резонанса: прошлое, настоящее, будущее // Материалы пленарного заседания 7-й Российской мультikonференции по проблемам управления ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2014. – С. 35–42.
2. **Шевченко А.Н., Захарова Е.А.** Исследование зависимости качества резонанса от распределения цезия в ячейке квантового датчика вращения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 4. С. 567–573. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-567-573
3. Larsen M., Bulatowicz M. Nuclear magnetic resonance gyroscope: for DARPA's micro-technology for positioning, navigation and timing program // Proc. IEEE Int. FrequencyControl Symposium, 2012. doi: 10.1109/fcs.2012.6243606
4. **А.К. Вершовский, Ю.А. Литманович, А.С. Пазгалев, В.Г. Пешехонов.** Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. №1. С. 55-80. DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.1.055-080
5. Liu X. и др. Transverse spin relaxation and diffusion-constant measurements of spin-polarized ^{129}Xe nuclei in the presence of a magnetic field gradient // Sci Rep. 2016. Т. 6. № 1.
6. Lee S. и др. Performance comparison between ^{87}Rb -natural Xe-N₂ and ^{87}Rb - ^{129}Xe - ^{131}Xe -N₂ atom spin gyroscopes // J. Korean Phys. Soc. 2021. Т. 78. № 3. С. 203–209.
7. Sakamoto, Y., Bidinosti, C.P., Ichikawa, Y. *et al.* Development of high-homogeneity magnetic field coil for ^{129}Xe EDM experiment. *Hyperfine Interact* **230**, 141–146 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10751-014-1109-5>
8. **Завитаев А.С.** Исследование деформацией элементов магнитной системы ядерного магнитного гироскопа // Сборник трудов XII Конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, 3-6 апреля 2023 г.) - 2023. - С. 15-17
9. **Алексеева В.А., Лукин А.В., Гагарский С.В., Сибирев М.Ю., Ханков С.И.** Температурная зависимость энергетических параметров лазеров на основе неодимсодержащих кристаллов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2001. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/temperaturnaya-zavisimost-energeticheskikh-parametrov-lazetrov-na-osnove-neodimsoderzhaschih-kristallov>
10. Walker T. G., Larsen M. S. Spin-Exchange-Pumped NMR Gyros // *Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics*. 2016. С. 373–401.
11. R. M. Noor and A. M. Shkel, "MEMS Components for NMR Atomic Sensors," in *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 27, no. 6, pp. 1148-1159, Dec. 2018, doi: 10.1109/JMEMS.2018.2874451.
12. **Шевченко А.Н., Захарова Е.А.** Методика формирования требований к градиенту магнитного поля при определении метрологических характеристик ячеек ядерного магнитного гироскопа // Альманах научных работ молодых ученых университета ИТМО. XLVII научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО. СПб., 2018. С. 176–179.

A.S. Zavitaev, M.I. Evstifeev (Concern CSRI Elektropribor, ITMO University, St. Petersburg, Russia). **Investigation of instrumental errors of the nuclear magnetic resonance gyroscope**

Abstract. The paper considers the instrumental errors of the nuclear magnetic resonance gyroscope. The influence of changes in the functional parameters in the gyroscope main systems on the instrumental errors is studied.

В. Д. КОСТЕНКО, М. А. БАРУЛИНА

(Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов)

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОСТОЙКОГО СТЕКЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Работа посвящена исследованию целесообразности использования радиостойкого стекла при изготовлении микромеханических акселерометров. Были рассмотрены собственные частоты, моды и чувствительность при ускорении акселерометра и сделаны выводы, что данный материал имеет потенциал в практическом применении.

Введение. Микромеханические акселерометры являются одним из важнейших компонент навигационных систем, использующихся в космической, ракетной и авиационной технике [1-3]. Они также находят применения в строительстве и системах мониторинга, например, в инклинометрах, используемых для измерения профиля нефтяных и газовых скважин в процессе бурения. Наиболее распространенным материалом для создания микроэлектромеханических систем (МЭМС) являются монокристаллический кремний и кварц. Однако оба материала не являются оптимальными по своим характеристикам для МЭМС гироскопов и акселерометров. Так производство монокристаллического кремния достаточно дорого, кремний является температурно-зависимым материалом, имеет среднюю радиационную стойкость. В тоже время изготовление акселерометров из кварца приводит к существенному увеличению массо-габаритных и стоимостных характеристик датчиков. Но потребность в МЭМС датчиках, как устройствах с малыми массогабаритными свойствами, низким энергопотреблением, и относительно низкой стоимостью только увеличивается. Поэтому задача создания и исследования новых материалов для проектирования МЭМС датчиков является актуальной. Настоящий доклад посвящен исследованию недостатков и преимуществ радиостойкого стекла для изготовления микромеханического акселерометра.

Постановка задачи. Для достижения поставленной цели был рассмотрен маятниковый акселерометр изготовленный из радиостойкого стекла К108 (lytkarino optical glass factory, ЛЗОС). Основная конструкция маятникового акселерометра состоит из чувствительного элемента, который представляет собой массу на упругом подвесе, который в рассматриваемом случае представляют собой консольную «балку», работающую на изгиб (рис. 1). Этот элемент при действии на него ускорения отклоняется от положения равновесия и по величине этого отклонения можно судить о действующем ускорении [4].

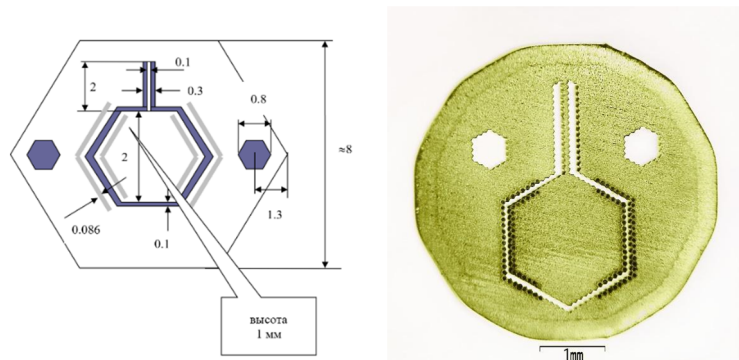


Рис. 1. Принципиальная схема и опытный образец чувствительного элемента стеклянного МЭМС

Численное моделирование. Для того чтобы оценить достоинства и недостатки рассматриваемой марки стекла для изготовления МЭМС акселерометра были поставлены и решены две задачи. Первая заключалась в исследовании собственных частот и мод (рис. 2), для определения устойчивости акселерометра к вибрационным нагрузкам, которые имеют место в летательном

аппарате при выводе его на орбиту и при эксплуатации в космическом пространстве. Вторая задача состояла в исследовании чувствительности акселерометра к измеряемому ускорению (рис. 3).

Таблица 1

Собственные частоты СтА										
Мода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Частота, Гц	1407	7237	12851	15006	28080	42379	87529	88201	$1.04 \cdot 10^5$	$1.05 \cdot 10^5$

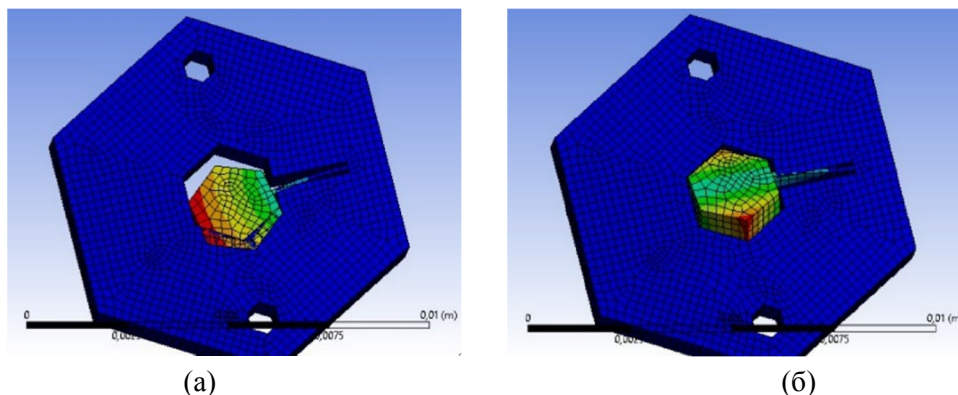


Рис. 2. Первая (а) и вторая (б) моды чувствительного элемента стеклянного МЭМС.

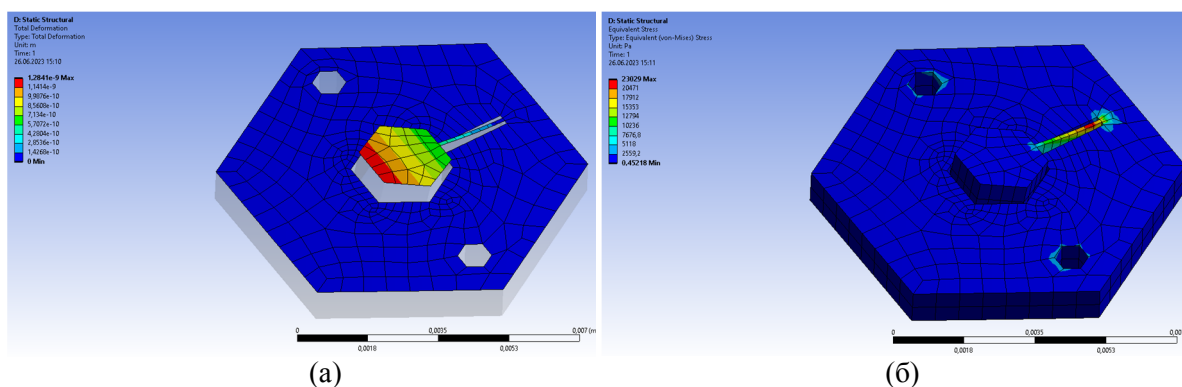


Рис. 3. Деформация (а) и эквивалентное напряжение (б) ЧЭ акселерометра при действии ускорения.

Таблица 2

Напряжение и деформация.					
Ускорение, g	0,5	1	1,5	2	2,5
Деформация (макс), нм	1.28	2.57	3.85	5.14	6.42
Эквивалентное напряжение (макс), кПа	23.03	46.06	69.09	92.12	115.15

Как видно из Таблицы 1 и рис. 2, первая частота достаточно большая (1407 Гц), что исключает возможность возникновения резонанса при стандартных вибрационных нагрузках, которые имеют в космических летательных аппаратах. Из рис. 3 и Таблицы 2 видно, что чувствительный элемент реагирует на измеряемое ускорение, и при этом изгиб упругого стеклянного подвеса не достигает критических значений, равных или превышающих предел прочности стекла на изгиб.

Выводы. Согласно проведенному моделированию, можно сделать вывод, что использование радиостойкого стекла К108 для изготовления МЭМС имеет потенциал. Изготовленные из него устройства имеют высокие собственные частоты, реагируют на измеряемое ускорение, при этом не эквивалентные напряжения в упругом подвесе чувствительного элемента не достигают критических значений. Поэтому представляется целесообразным дальнейшее исследование возможности практического использования радиостойкого стекла для МЭМС акселерометров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Драч В. Е., Кондратов Д. А., Шмелькова А. А.** Инфракрасные датчики крена для определения угловой ориентации летательного аппарата. // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. No 1 (39). С. 21-30.
2. **Barulina M. A., Galkina S. A., Kondratov D. V., Markelova O. V.** Nanoscale Inertial-Sensor Elements. Numerical and Analytical Modeling of Motion // Сб. тезисов докладов 28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), (31 мая – 02 июня 2021 г., Санкт-Петербург), 2021. P. 9470790.
3. **Пылаев Ю. К., Барулина М. А., Ефремов М. В., Голиков А. В.** Опыт разработки комплекса исполнительных и чувствительных элементов для малых космических аппаратов // Сб. тезисов докладов XIV Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2021): материалы: в 4 т. (27 сентября – 02 октября 2021 г., Дивноморское, Геленджик). Том 3. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2021. С. 96-98.
4. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы Учебное пособие. Тул. Гос. университет. Тула, 2002 г. 392 с.

V.D. Kostenko, M.A. Barulina (Institute For Problems In Precision Mechanics And Control Of RAS, Saratov State University, Saratov, Russia). **On using radioresistant glass in fabricating MEMS accelerometers**

Abstract. The Paper Studies The Expediency Of Using Radioresistant Glass In Fabrication Of MEMS Accelerometers. The Accelerometer Natural Frequencies, Modes, And Sensitivity Were Considered During Its Acceleration, And It Was Found That The Application Of Radioresistant Glass Has A Practical Potential.

Generation of a high-flux and collimated rubidium atom beam source

Xiangxiang, Lu

Tianjin Navigation and Instrument Institute, Tianjin 300131, P.R. China; Laboratory of Quantum Precision Measurement Technology (Tianjin), Tianjin 300131, P.R. China; lumuxin1234@126.com

Chuang, Pei

Tianjin Navigation and Instrument Institute, Tianjin 300131, P.R. China; Laboratory of Quantum Precision Measurement Technology (Tianjin), Tianjin 300131, P.R. China; liujianxyz@foxmail.com

Qianyun, Zhao

Tianjin Navigation and Instrument Institute, Tianjin 300131, P.R. China; Laboratory of Quantum Precision Measurement Technology (Tianjin), Tianjin 300131, P.R. China; qianaayun@126.com

Jian, Liu

Tianjin Navigation and Instrument Institute, Tianjin 300131, P.R. China; Laboratory of Quantum Precision Measurement Technology (Tianjin), Tianjin 300131, P.R. China; wjy3861@163.com

Jieying, Wang

Tianjin Navigation and Instrument Institute, Tianjin 300131, P.R. China; Laboratory of Quantum Precision Measurement Technology (Tianjin), Tianjin 300131, P.R. China; peich-0@sohu.com

Junxin, Wei

Tianjin Navigation and Instrument Institute, Tianjin 300131, P.R. China; Laboratory of Quantum Precision Measurement Technology (Tianjin), Tianjin 300131, P.R. China; weijunxin@aliyun.com

Abstract—A high-flux and collimated rubidium atom beam has important application in the fields of precision rotation measurement and atomic clocks. Starting from the principle of atomic interference measurement, the need of atom interference gyroscope for performance parameters of the atom beam is briefly introduced. An atom beam generation method that uses micro-channel stainless arrays is proposed, which is used to complete the parameter design and verification system construction. A preliminary parameter characterization is performed, with a peak atomic flux of 2.1×10^{12} atoms/s, a full divergence angle of 16 mrad, the test results agree well with theoretical calculation. A $\pi/2$ - $\pi/2$ Ramsey interferometer with an interval of 200 mm is also performed, which proves good coherence of the atom beam, and thus pave the way to high-sensitivity atom interferometry measurement.

Key words—atom interference; atomic beam; capillary array

I. INTRODUCTION

Since atomic interference technology was applied to high-precision gravity measurement for the first time in 1991 [1], it has been widely extended to rotation [2, 3, 4], acceleration [5], gravity gradient [6, 7], fine structure constant [8], verification of weak equivalent principle [9] and other fields. In dynamic application scenarios, large bandwidth, high data rate, and no measurement dead time are required, which requires that atoms continuously participate in the interference process and resolve inertial information in real time. At present, there are two types of solutions: cold atom beam and thermal atom beam can be used to perform continuous atomic interference measurement. The former method utilizes two-dimensional or three-dimensional magneto-optical trap to cool atoms, with velocity on the order of 10 m/s and good horizontal divergence suppression. The atomic flux is usually small and on the order of 10^8 - 10^{10} atoms/s. Instead, the flux of an thermal atom beam can be up to 10^{12} - 10^{14} atoms/s with a velocity of ~ 300 m/s. Take the atom interference gyroscope as an example, under same physical dimensions, the rotation measurement sensitivity of thermal atom beam is 3-4 times higher than that of cold atom beam, and almost immune to vibration noise and gravity acceleration, rendering better environmental adaptability. Therefore, generating a high-flux and collimated atomic

beam is of great significance for the development of high-performance atom interference gyroscopes.

II. PRINCIPLE AND SYSTEM DESIGN

A. Performance Demand of the Atomic Source for Atomic Interference Gyroscope

Taking the classic three-pulse atom interference configuration as an example, as shown in Figure 1, assuming that \bar{v} the mean longitudinal speed of the atom, T the time interval, τ the time of the $\pi/2$ pulse, L central distance of Raman lasers, d size of the $\pi/2$ Raman beam in the direction of atom moving. Therefore, the phase shift of a three-pulse atomic beam interferometer resulting from rotation speed Ω can be represented as equation (1) [10]

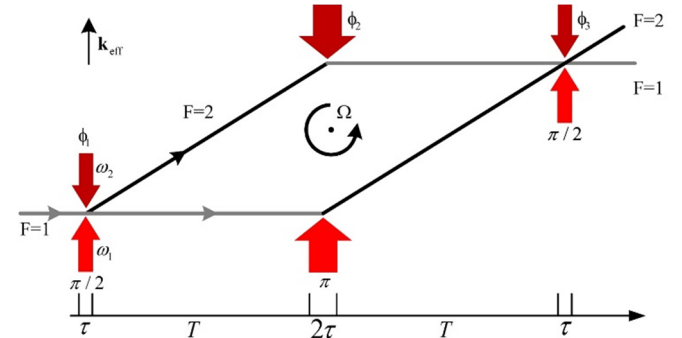


Figure 1. Principle of a three-pulse atom interference measurement.

$$\Delta\phi = 2k_{\text{eff}}L^2 / v \times \Omega \quad (1)$$

From equation (1), it can be seen that if a higher rotation measurement accuracy is required, one can increase the scale factor, and on the other hand, it is necessary to reduce phase noise of the interference fringe. For a real physical system, once the geometry size is determined, the scale factor is usually fixed. At this time, if we want to improve the measurement sensitivity of the atom interference gyroscope, it is mainly achieved by decreasing the phase noise of the system. For inertial sensors based on atom interference, the minimum measurable phase corresponds to the shot-noise limit $\delta\phi = \sqrt{N/2}$, where N is the flux of an atom beam. Considering that the fringe contrast in a actual system cannot

reach 100%, the signal-to-noise ratio (SNR) of detection can be described as $SNR = \eta\sqrt{2N}$, where η the fringe contrast. Therefore, equation (1) can be further represented as equation (2), which characterizes the short-term rotation measurement sensitivity of the atom interference gyroscope

$$\Delta\Omega = \frac{1}{\eta\sqrt{N/2}} \times \frac{\bar{v}}{2k_{eff}L^2} \quad (2)$$

Therefore, preparation of a high-flux atom beam is of great significance to improve the performance of the atom beam interference gyroscope. Take the rubidium atom as an example, its effective wave-vector $k_{eff} = 1.61 \times 10^7/\text{m}$, interference interval $L = 0.1\text{m}$, interference contrast $\eta = 0.3$, mean longitudinal speed $\bar{v} = 300\text{ m/s}$. The relationship between rotation measurement sensitivity and atomic beam flux is shown in Figure 2. For comparison, Figure 2 gives a low-speed atomic beam with $\bar{v} = 10\text{m/s}$, and the atomic speed and beam flux are referenced from [11]. Since the cooling process is selective for the atom, it will reduce achievable beam flux. For given geometric sizes, a thermal atom beam with higher velocity and flux has advantages in high precision rotation measurement. When the system parameters are determined, speed and flux of the atom beam can be adjusted to achieve required sensitivity. Given same measurement accuracy, the faster atoms move, the higher the required atom beam flux.

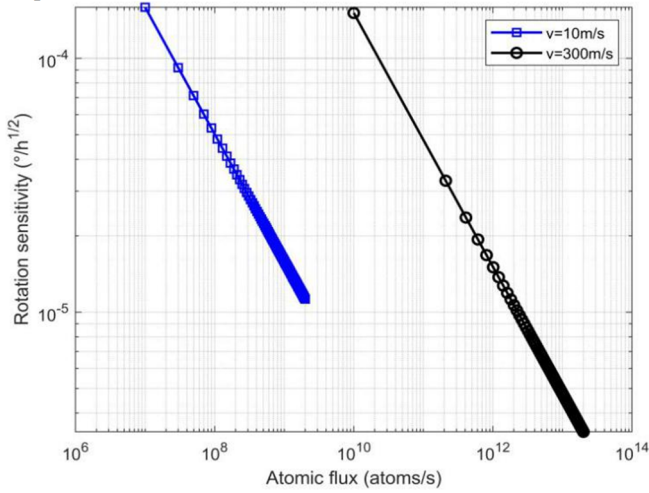


Figure 2. The relationship between gyroscope sensitivity and atomic beam flux

On the other hand, in order to obtain a high interference contrast, the efficiency of Raman light is required as high as possible, that is, Raman light should cover most atoms with different velocity. This requires the Rabi frequency Ω large enough to meet $\Omega > k_{eff} \times v_T$, where v_T is the horizontal speed of the atomic beam. In order to obtain suitable divide and reflection effect, the optical power should meet $\Omega\tau = \pi/2$, which mean a small atom-Raman interaction time. In this way, the horizontal speed and horizontal temperature of the atomic beam should meet equation (3)

$$v_T < \frac{\pi\bar{v}}{2k_{eff}d}, T < \frac{m}{k_B} \left(\frac{\pi\bar{v}}{2k_{eff}d} \right)^2 \quad (3)$$

Furthermore, requirements of the divergence angle can be expressed $\theta < \pi / (k_{eff}d)$. Figure 3 gives a set of typical Raman beam diameters corresponding to different

divergence angles. For smaller Raman diameters, because its Rabi oscillation frequency is large enough, most atoms can be addressed, so a greater divergence angle can be allowed.

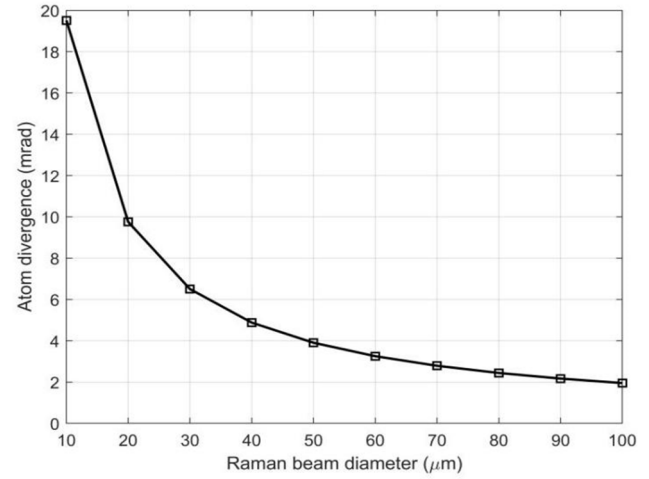


Figure 3. The relationship between atomic divergence angle and Raman beam diameter.

B. Experimental Setup Design

Based on above analysis, in order to further improve the rotation measurement accuracy limit of the atom interference gyroscope, the flux of atomic beam should be increased as much as possible. Therefore, the following section will be based on a thermal atom beam as the main object to introduce corresponding design to achieve a high -flux output. Figure 4 shows a schematic diagram of a typical atomic beam device, where a symmetrical structure design is adopted. From both ends to the center, it mainly includes rubidium source, vacuum tube, collimator, detection chamber, probe light, photomultiplier tube (PMT) and ion pump. Among them, the detection chamber and the ion pump are connected through a vacuum tube, and the interface is sealed with a vacuum flange. The vacuum of the entire device is maintained through a ion pump with a pumping speed of 10 L/s, and the vacuum is $3 \times 10^{-8}\text{ Pa}$ when not working. Optical windows are opened in central area of the detection chamber, which is used to characterize the beam flux, divergence angle and beam width of the atomic beam.

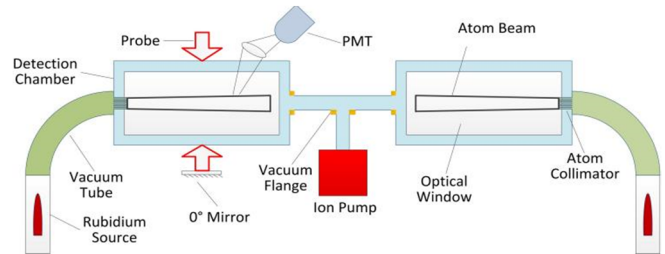


Figure 4. Scheme of experimental setup.

The production process of the atomic beam is to generate a large amount of atomic vapor by heating the sources at both ends of the device. Atoms reach the atom collimator device through the curved vacuum tube. Since atomic collimator is selective for atom speed, only atoms with small divergence angles can pass the collimator, thus producing a high-flux and collimated atom beam. In the detection chamber, the probe light uses a pair of light resonant with the frequency of $F = 2 \rightarrow F' = 3$ transition line to shine atoms from the vertical direction, and then one can use the lens group to collect fluorescent signals generated by atomic spontaneous emission into the

PMT. Parameter information such as atomic flux and horizontal speed of the atomic beam can thus be obtained.

It can be seen that because the atomic divergence angle directly from the source is extremely large, it is necessary to reasonably design the parameters of the atomic collimator to obtain a small divergence angle, thereby generating a high flux. At present, there are two ways to collimate the atomic beam. The first method uses a single and slender non-magnetic stainless steel tube to limit the atomic beam divergence. The structure is simple, but this method requires a long distance to reach comparable collimation. Besides, this tube is quite easy to block. On the contrary, the second method reduces the diameter and length of the metal tube, and achieves low divergence, but the atomic flux decreases sharply. In order to compensate the atomic flux loss, a same method is used and many tubes are uniformly placed in a circular region, forming a micro-metal tube array, thus a high-flux and collimated atom beam can be obtained in small size. Therefore, this paper chooses the second method as the design basis of the atomic collimator. The design mainly considered from three aspects. First is to choose the length and diameter of the atomic standard (long diameter ratio) to meet the divergence requirement; then future interference should be considered, since most Raman diameters are less than 2 cm, so the atomic beam diameter should be less than 2 mm to ensure better Raman efficiency; Last is good design to produce a higher beam flux.

Because the atom interference gyroscope adopts counter-propagating structure, in order to ensure that the atomic beam has a good overlap on the spatial trajectory, the micro-metal array area of the atomic collimator device should be configured as a circular layout. The collimator diameter is D , inner diameter of the tube $2a$, the length is L . Table 1 gives several different micro-metal tube parameters of the divergent angle and atom flux. By different combinations of the length, diameter and regional diameter (number of micro-tube) of micro-metal tubes, we can meet most applications based on atom interferometers.

TABLE I. ATOM PARAMETERS WITH DIFFERENT CAPILLARY SIZES.

Capillary size	$L=2$ cm	$L=2$ cm	$L=1$ cm	$L=1$ cm
	$d=0.1$ mm	$d=0.2$ mm	$d=0.2$ mm	$d=0.1$ mm
Atom beam				
Flux (atoms/s)	1.4×10^{12}	2.6×10^{12}	5.6×10^{12}	1.6×10^{12}
Divergence angle (mrad)	10	20	20	20

III. IMPLEMENTATION AND RESULTS

According to above theoretical analysis and calculation, construction and validation of the atomic beam generation device is completed. The physical setup is shown in Figure 5, where left shown is the probe light and PMT, and right shown is the capillary array with a total transmission diameter of 2 mm. The fluorescent method and slit scanning method were used to measure the flux, the divergence angle and atomic beam width, respectively.

The flux of the atomic beam can be calculated by equation (4)^[12]:

$$Flux = \frac{U}{G_{PMT}} \frac{4\pi}{\eta \eta R} \frac{\bar{v}}{d\Omega} \frac{2}{dz} \frac{1+s}{\Gamma s} \quad (4)$$

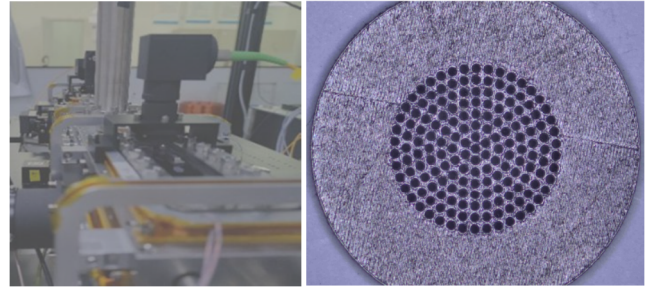


Figure 5 Physical device of the atomic beam.

In this equation, U is the output voltage of PMT, G_{PMT} is the internal gain of PMT, η is the quantum conversion efficiency of PMT, R is the transmissions of PMT, $d\Omega$ is a three-dimensional solid angle of the fluorescent lens group. \bar{v} is the mean longitudinal speed, dz is the size of detecting light in the direction of the atom movement. Γ is the natural transition line width of the rubidium atom, s is the saturation coefficient of the probe light. Figure 6 shows the actual measured atomic absorption signal (black solid line). As a comparison, the laser's modulation transfer spectrum signal (blue dotted line) when scanning the probe frequency is given. Bringing the experimental parameters into equation (4), the calculate atomic beam flux is 2.1×10^{12} atoms/s.

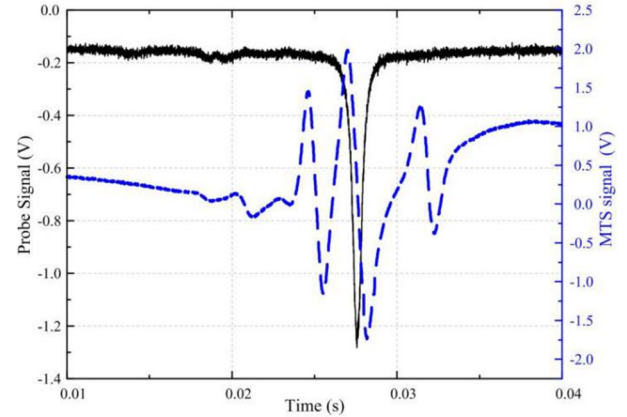


Figure 6. Atomic beam detection signal.

The divergence angle of the atomic beam can be calculated by measuring the horizontal speed component of the atom and compared with the vertical average speed. Due to doppler effect, when the frequency of probe light is scanned, the fluorescent signal collected by PMT will broaden the horizontal divergence of the atomic beam. By gaussian fitting of the measurement signal, the full width at half maximum (FWHM) can be obtained, one can use equation (5) to calculate the divergence angle of the atomic beam^[13]:

$$\theta = \frac{\lambda \Delta f_{FWHM}}{\sqrt{2} \ln 2 \bar{v}} \quad (5)$$

In this equation, λ is the wavelength of probe light, \bar{v} is the average longitudinal speed of the atom beam, and Δf_{FWHM} is the full-width at half maximum value of the gaussian fitting. Inserting related parameters into equation (5) and the calculated full divergence angle of the atomic beam is 16.3mrad. Moreover, by measuring the horizontal spatial distribution of the atomic flux in different locations along the atom motion direction, the horizontal speed of the atomic

beam can also be deduced, and again the divergence angle can be calculated. The test results are shown in Figure 7.

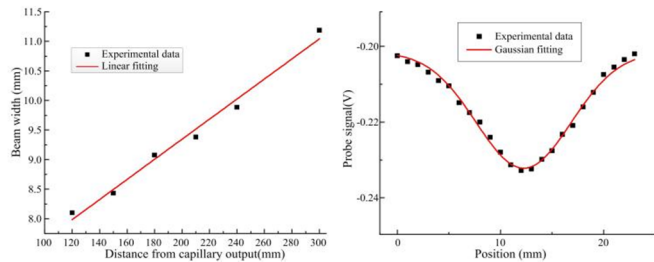


Figure 7 Different beam distribution at different locations. Left: divergence angle; Right: typical spatial distribution of an atomic beam.

After the atomic beam is ejected from the micro-metal tube array, the probe light is scanned horizontally at locations of 120 mm, 150 mm, 180 mm, 210 mm, 240 mm, and 300 mm along the transmission direction of the atom beam, and then the changes of PMT signal is recorded as the probe light moves. By linear fitting of experimental data, the divergence angle of the atomic beam is about 15.7 mrad. It can be seen that the measurement result agrees well with aforementioned divergence angle 16.3 mrad, both are slightly larger than the theoretical value of 14.9 mrad. On one hand, this is due to the impact of strong probe light power, angle between the atom beam and probe light. On the other hand, the slit-scanning method takes a long time, and the frequency locking of lasers, optical power, and atomic beam flux can change during the measurement process. In general, the result of the two measurement methods is basically the same, and equals to theoretical values, which proves collimation of the atom beam.

Furthermore, in order to verify coherence of the atomic beam, we construct a $\pi/2$ - $\pi/2$ co-propagating configuration to perform a Raman-Ramsey interferometer with a distance of 200 mm. With optimized optical power and Raman beam size, the Raman-Ramsey interference pattern is observed, as illustrated as Figure 8.

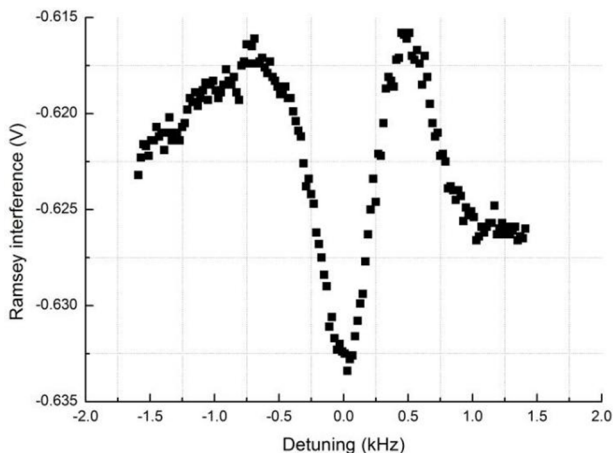


Figure 8. Raman-Ramsey interference pattern with a distance of 200 mm, the full width at half maximum is 450 Hz

The full width at half maximum of central fringe is 454 Hz, consistent with the theoretical value. This Ramsey

interference pattern clearly shows good coherence of the generated rubidium atom beam.

IV. CONCLUSION

In order to meet the demand of atomic interference measurement to rotation applications, this paper proposes a technical solution based on micro-channel stainless arrays as an atomic collimator, and conduct theoretical analysis and parameter design. The atomic beam generation device was constructed and flux, divergence angle and beam width of the atomic beam were carried out, with a flux of 2.1×10^{12} atoms/s, and a full divergence angle of 16 mrad. Test results agree well with theoretical calculation, which verify the possibility of our technical scheme. Future work will focus on laser cooling and three-pulse interference measurement. This high-flux and collimated atom beam should find applications in fields such as atomic inertial sensing and atomic clocks.

REFERENCES

- [1] M. Kasevich and S. Chu. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions [J]. *Phys. Rev. Lett.* 67, 2: 181-184, 1991.
- [2] G. Raithel, et. al. Principles of tractor atom interferometry [J]. arxiv: 2207.09023v1, 2022.
- [3] Z.X. Meng, P.Q. Yan, S.Z. Wang, et. al. Closed-Loop Dual-Atom-Interferometer Inertial Sensor with Continuous Cold Atomic Beams [J]. arxiv: 2210.15346v1, 2022.
- [4] R. Gautier, M. Guessoum, L.A. Sidorenkov, et. al. Accurate measurement of the Sagnac effect for matter waves [J]. *Sci. Adv.* 8, eabn8009 : 1-6, 2022.
- [5] J. Lautier, et. al. Hybridizing matter-wave and classical accelerometers [J]. *Appl. Phys. Lett.* 105, 14:144102, 2014.
- [6] F. Sorrentino, Q. Bodart, L. Cacciapuoti, et. al. Sensitivity limits of a Raman atom interferometer as a gravity gradiometer [J]. *Phys. Rev. A* 89, 2: 023607, 2014.
- [7] R. Caldani, K. X. Weng, S. Merlet, et. al. Simultaneous accurate determination of both gravity and its vertical gradient [J]. *Phys. Rev. A* 99, 3: 033601, 2019.
- [8] B.C. Young. A measurement of the fine-structure constant using atom interferometry [D]. Stanford University, 1997.
- [9] L. Zhou, et. al. Test of Equivalence Principle at 10^{-8} Level by a Dual-Species Double-Diffraction Raman Atom Interferometer [J]. *Phys. Rev. Lett.* 115, 1: 013004, 2015.
- [10] T.L. Gustavson, A. Landragin, and M.A. Kasevich. Rotation sensing with a dual atom-interferometer Sagnac gyroscope [J]. *Class. Quantum Grav.* 17: 2385-2398, 2000.
- [11] Z.X. Meng, P.Q. Yan, X.J. Li, et. al. An atom Sagnac interferometer with continuous cold atomic beam sources [J]. 2020 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, 23-26 March 2020.
- [12] S. Chaudhuri, S. Roy, and C.S. Unnikrishnan. Realization of an intense cold Rb atomic beam based on a two-dimensional magneto-optical trap: Experiments and comparison with simulations [J]. *Phys. Rev. A* 74, 2: 023406 (2006).
- [13] C. R. Nave. Broadening of Spectral Lines, *HyperPhysics* [B], 2017.

Direct Coupling Technology of Hollow-core Microstructure Fiber Optic Gyroscope

Maochun Li
Tianjin Navigation Instruments
Research Institute
Tianjin, China
limaochun@yeah.net

Xiaoming Zhao
Tianjin Navigation Instruments
Research Institute
Tianjin, China
tjhhyq@yeah.net

Miao Yan
Tianjin Navigation Instruments
Research Institute
Tianjin, China
pipo1999@sina.com

Fei Hui
Tianjin Navigation Instruments
Research Institute
Tianjin, China
hf58665895@163.com

Fan Li
Tianjin Navigation Instruments
Research Institute
Tianjin, China
vaanlie@hotmail.com

Abstract—In this paper, an optical path assembly method is proposed for realizing the direct coupling of bare Y waveguide chip and hollow-core microstructure fiber (HMF) coil by introducing a combination of micro lenses and reflective mirror between the bare Y waveguide chip and the cleaved end of HMF pigtail. The direct coupling experiment results show the single-ended coupling loss is less than 0.5 dB, and the single-ended polarization crosstalk is better than -30 dB. A HMF gyroscope is constructed by using the fabricated direct coupling assembly of Y waveguide chip and HMF coil, and the bias instability of the HMF gyroscope is better than 0.005°/h.

Keywords—hollow-core microstructure fiber, fiber optic gyroscope, direct coupling, Y waveguide chip, fiber coil

I. INTRODUCTION

The inertial navigation system (INS) is a self-contained navigation technique in which measurements provided by accelerometers and gyroscopes are used to track the position and orientation of an object relative to a known starting point, orientation and velocity. Gyroscopes are one of the key sensors for INSs, and are used widely for underwater robots, ships, cars, airplanes, satellites and so on [1]-[3]. Technology advancements in optical fibers have enabled the fiber optic gyroscope (FOG) to become an attractive choice for demanding applications. In particular, a relatively new type of optical fiber with a hollow core allows light signals to propagate mainly in air and overcome many of the limitations of conventional silica core fibers. To achieve high-quality air light guidance in fiber, the hollow core needs to be surrounded by a complex and precision hollowed-out silicon microstructure to form a photonic bandgap light guide mechanism or anti-resonant reflection light guide mechanism [4]-[11]. Using the HMF to construct Sagnac sensitive interference optical path (Y waveguide chip + fiber coil) for FOG, compared to conventional fibers, it can obtain 23× lower temperature sensitivity (Shupe effect), >100× lower magnetic sensitivity (Faraday effect) and >50× lower radiation sensitivity in theory [12].

To realize the full potential of HMFs applied in FOG, it is necessary to efficiently couple light from Y waveguide chip to fiber coil winding with HMFs. In the development and production of traditional FOG, fusion splicing is the most mature optical path assembly technology for solid-core pigtailed Y waveguide chip and fiber coil. However, the air holes in HMFs may completely collapse in the vicinity of the splice joint during the splicing process, which significantly

increases the coupling loss by destroying the light-guiding structure of the HMF near the joint interface, and is not conducive to the construction of FOG. The optical path assembly between HMF coil and Y waveguide with high reliability is one of the urgent engineering problems in the application of HMF in gyroscope.

II. HOLLOW-CORE MICROSTRUCTURE FIBER

HMFs are usually single material fibers with air-holes that define their transverse profile. Currently, there are two main categories of HMF, which are hollow-core anti-resonant fibers and hollow-core photonic crystal fibers. HMFs are expected to become an ideal material for rotation sensing in FOGs because of their unique air core light guiding mechanism, but to meet the application requirements of high precision FOGs, the mode purity, transmission loss and backscattering of hollow-core photonic crystal fiber still need to be broken through mechanically, while the bending loss and polarization maintenance of hollow-core anti-resonant fiber need to be further improved.

A. Hollow-core anti-resonant fibers

Because of significant breakthroughs over the past few years, hollow-core anti-resonant fibers are generating hopes that they might one day become the ultimate optical fiber, simultaneously demonstrating the lowest attenuation, optical nonlinearity and chromatic dispersion over a broad bandwidth, whilst providing near-vacuum latency. Hollow-core anti-resonant fibers that are a novel type of hollow-core fibers employ minimalist cladding structure as shown in Figure 1 [13] to form the anti-resonant reflecting optical waveguide model, rather than photonic bandgaps, as the mechanism of light guidance.

Reviewing the development history of hollow-core anti-resonant fibers, some significant improvements in optical performance, modal quality and bandwidth were made possible over the last decade first by the introduction of a negative curvature core surround [14], then by fiber topologies with a single layer of non-touching tubes [15], and finally by the addition of small nested tubes to increase the number of coherent air/glass reflections in the radial direction and thus reduce confinement loss [16]-[17]. For example, the fiber design as shown in Figure 1 is known as hollow-core nested anti-resonant nodeless fiber that exhibits many advantages, including low loss, large bandwidth, low nonlinearity, high damage threshold, and ultralow latency, owing to its special structure and guidance mechanism [18]-[22].

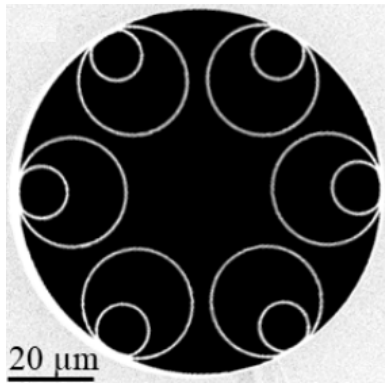


Fig. 1. The geometry of the hollow-core anti-resonant fiber (scale bar indicates 20 microns).

B. Hollow-core photonic crystal fibers

As can be seen in Figure 2, a typical Hollow-core photonic crystal fiber comprises one to two hundred wavelength-scale air holes, normally with a very high air filling factor, arranged in a 2-D array that is maintained along the full length of the fiber [23]-[26].

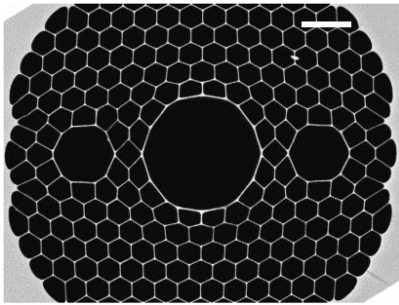


Fig. 2. The geometry of the hollow-core photonic crystal fiber (scale bar indicates 10 microns).

Hollow-core photonic crystal fibers exploit photonic bandgaps of the cladding periodic structure, rather than total internal reflection, as the mechanism of light guidance. The cladding periodic structure is made of capillaries, filled with air, laid to form a hexagonal lattice. Light can propagate along the fiber in defects of its crystal structure, which is realized by removing one or more central capillaries. Excellent polarization control can be achieved through tiny asymmetries in the hollow-core geometry. In addition, the two hollow shunts are included in the cladding in Figure 2 in order to selectively suppress high-order modes of the core [27].

III. SCHEME OF DIRECT COUPLING BETWEEN HMF COIL AND Y WAVEGUIDE CHIP

The direct spatial coupling method is adopted to avoid the microstructure collapse caused by the fusion of the HMFs, as shown in Figure 3. Two groups of micro lens are introduced between the pigtail of HMF coil and the bare Y waveguide chip, and the micro lens plays the role of optical collimation and convergence. therefore, the HMF pigtail and the bare Y waveguide chip can be coupled with low loss without mode field matching. In addition, a reflective mirror is arranged between a group of micro lens and the collimating beam emitted from the micro lens is reflected twice, so that the parallel light beams transmitted in the two groups of micro lens are separated apart in space. One is that the distance is large to avoid crosstalk between the two

parallel light beams, and the other is that the space is large to facilitate direct spatial coupling operation.

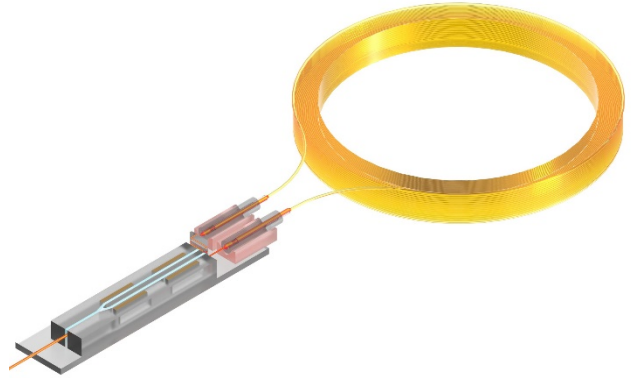


Fig. 3. The scheme of direct coupling between HMF coil and bare Y waveguide chip.

IV. EXPERIMENTS

A. Direct Coupling Experiments

The direct coupling experiments of the HMF and the bare Y waveguide chip is carried out to test coupling loss and polarization crosstalk, as shown in Figure 4. The end of the selected bare Y waveguide chip has an inclination angle of 10° , and the end of the micro lens has an inclination angle of 8° , in order to eliminate the Fresnel reflection loss, and the end of the HMF is cut flat and has no angle, whose cross-sectional view is illustrated in Figure 5. As can be seen, it is a type of 7-cell bandgap-guided polarization maintaining HMF, whose cladding diameter is $125\mu\text{m}$ and mode field diameter is $9\mu\text{m}$.

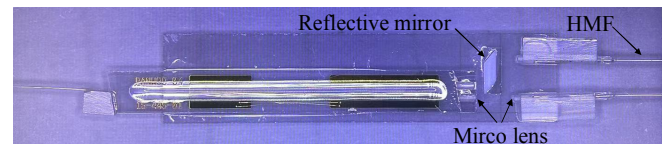


Fig. 4. The direct coupling of the HMF and the bare Y waveguide chip.

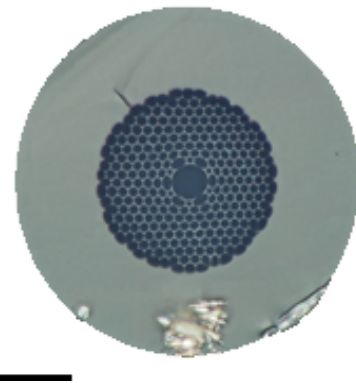


Fig. 5. The geometry of the 7-cell bandgap-guided HMF (scale bar indicates 40 microns).

The coupling efficiency between HMF and bare Y waveguide chip η can be calculated by equation (1). One can see from equation 1, after avoiding the mode field mismatch loss and Fresnel reflection loss, the loss of direct coupling between HMF and bare Y waveguide chip is determined by alignment deviation loss.

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(x,y) \varphi_2(x,y) dx dy \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} |\varphi_1(x,y)|^2 dx dy \int_{-\infty}^{\infty} |\varphi_2(x,y)|^2 dx dy} \quad (1)$$

Where $\varphi_1(x,y)$ is the mode field distribution function of HMF and $\varphi_2(x,y)$ is the mode field distribution function of bare Y waveguide chip.

The alignment deviation loss is caused by the transverse, axial and angular offset between the micro lens center of the waveguide and the micro lens center of the HMF core. on the one hand, the alignment deviation loss is due to the lack of alignment accuracy. on the other hand, it is caused by the small alignment tolerance between the center of the waveguide micro lens and the center of the HMF micro lens. If the alignment tolerance is large, even if there is a slight offset, the coupling loss will not be greatly increased. The three cases of alignment deviation are shown in Figure 6 respectively.

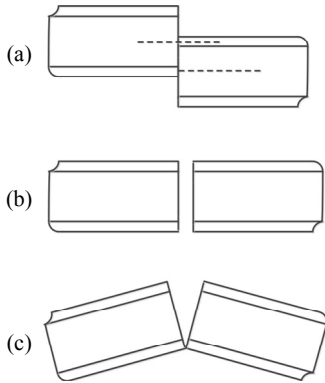


Fig. 6. The direct coupling alignment deviation of HMF coil and bare Y waveguide, (a) transverse offset; (b) axial offset; (c) angular offset.

In the aspect of polarization crosstalk, the bare Y waveguide chip works in the single polarization state of the TE mode. when coupling with the polarization maintaining HMF, it is necessary to ensure that the polarization axis direction of the bare Y waveguide chip is consistent with the working axis selected by the polarization maintaining HMF in order to achieve low pigtail polarization crosstalk. Assuming that the working axis (slow axis) of the polarization maintaining HMF is at an angle θ with the TE mode direction of the bare Y waveguide chip, the polarized crosstalk K_p of the HMF pigtail can be represented by equation (2).

$$K_p = 10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 10 \lg (\tan^2 \theta) \quad (2)$$

Where P_1 is the output optical power of HMF pigtail in the working axis (slow axis), $P_1 = P_0 \cos^2 \theta$, P_0 is the output optical power of the bare Y waveguide at TE mode, P_2 is the output optical power of HMF pigtail in the fast axis, $P_2 = P_0 \sin^2 \theta$.

It can be seen from equation (2) that in order to ensure that the polarization crosstalk K_p of the HMF pigtail is better than -30dB, the polarization axial alignment deviation angle θ should not be more than 1.8° . In the actual process, it is necessary to make the selected working axis of the polarization maintaining HMF parallel to the working axis of the bare Y waveguide chip as far as possible.

Intercepting two segments of 0.5 m HMF to couple both ends of the bare Y waveguide chip many times, for measuring repeatedly coupling loss and polarization crosstalk. The test results are as follows in Table 1. The direct coupling experiment results show the single-ended coupling loss is less than 0.5 dB, and the single-ended polarization crosstalk is better than -30 dB.

TABLE I. THE TEST RESULTS OF DIRECT COUPLING LOSS AND POLARIZATION CROSSTALK

Tests No.	Test Item	
	Coupling loss	Polarization crosstalk
1	0.47 dB	-30.36 dB
2	0.49 dB	-30.24 dB
3	0.43dB	-30.61 dB
4	0.45 dB	-30.56 dB
5	0.44 dB	-30.39 dB
6	0.47 dB	-30.27 dB
7	0.48 dB	-30.45 dB
8	0.46 dB	-30.36 dB
9	0.44 dB	-30.66 dB
10	0.45 dB	-30.73 dB

B. FOG Experiments

Based on the previous optical path assembly method, we fabricate a direct assembly of HMF coil and Y waveguide that is illustrated in Figure 7. The HMF coil is constructed by a 300m-long 7-cell bandgap-guided HMF quadrupolar wound on a 98-mm-diameter spool.

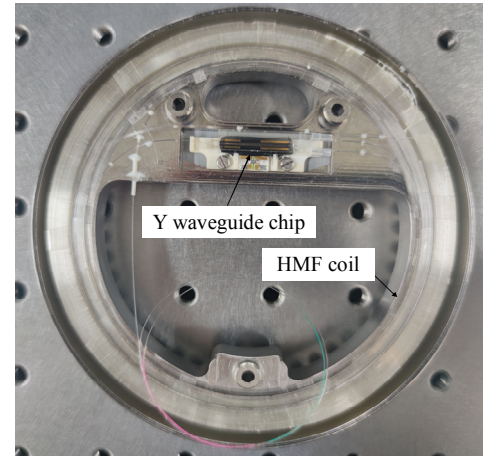


Fig. 7. The fabricated direct coupling assembly of Y waveguide chip and HMF coil.

Next, a HMF gyroscope is constructed by using the fabricated direct coupling assembly of Y waveguide chip and HMF coil. Each of the major components of the HMF gyroscope prototype utilizing the direct coupling assembly can be seen in Figure 8. These components are the ASE light source with a spectral width of 40 nm, 1×2 coupler, Y waveguide chip for applying a square wave bias modulation with $3\pi/4$ amplitude and a closed-loop feedback signal that is proportional to the rotation rate, HMF coil, low noise photodetector and a processing circuit. The bias output of the HMF gyroscope is obtained by demodulating the photodetector signal with the processing circuit.

The bias stability of the HMF gyroscope after 100s smoothing recorded over a period of 25 h at room temperature is displayed in Figure 9, which is 0.044 °/h (100s, 1σ). The Allan deviation of the 25 h bias stability is plotted in Figure 10, and the bias instability inferred from this curve is better than 0.005 °/h.

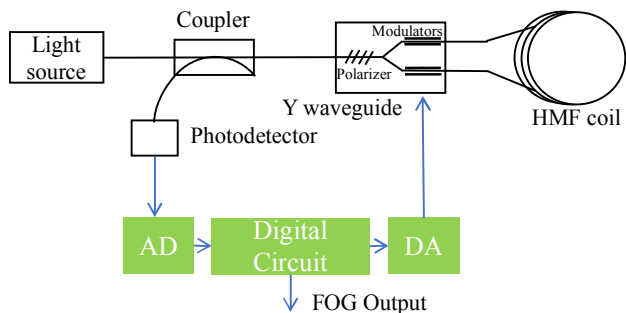


Fig. 8. Schematic of a closed loop HMF gyroscope.

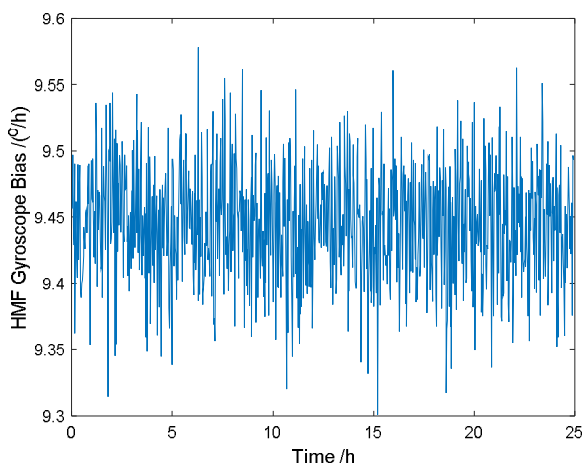


Fig. 9. The bias stability of of the HMF gyroscope.

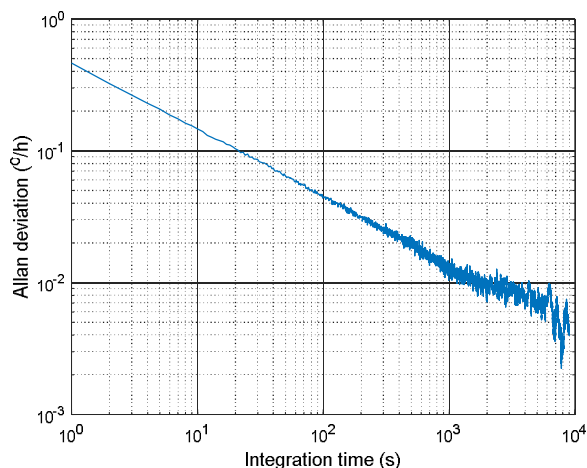


Fig. 10. The Allan deviation of the HMF gyroscope.

V. CONCLUSION

Aiming at the inevitable collapse of HMF during fusion splicing, we propose an optical path assembly method to realize the direct coupling of bare Y waveguide chip and HMF coil by introducing a combination of micro lenses and reflective mirror between the bare Y waveguide chip and the

cleaved end of HMF pigtail. The effectiveness of the method is proved by both device-level and gyro-level experiments. Utilizing the fabricated direct coupling assembly of Y waveguide chip and HMF coil, we construct a HMF gyroscope whose bias instability of the HMF gyroscope is better than 0.005°/h.

REFERENCES

- [1] Barbour N., Schmidt G., "Inertial sensor technology trends," IEEE Sens. J., 2001, 1, pp. 332–339.
- [2] Lawrence A., Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control. Springer Verlag: Berlin, Germany, 1998.
- [3] Titterton D. H., Weston J. L., Strapdown Inertial Navigation Technology. Peter Peregrinus Ltd.: London, UK, 2004.
- [4] F. Benabid, P. J. Roberts, "Linear and nonlinear optical properties of hollow core photonic crystal fiber," J. Mod. Opt., 58(2), pp. 87–124, 2011.
- [5] F. Yu, J. C. Knight, "Negative Curvature Hollow-Core Optical Fiber," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 22(2), pp. 146–155, 2016.
- [6] C. Wei, R. Joseph Weiblen, C. R. Menyuk, J. Hu, "Negative curvature fibers," Adv. Opt. Photonics, 9(3), pp. 504–561, 2017.
- [7] W. Ding, Y.Y.Wang, S. F. Gao, M.-L.Wang, and P.Wang, "Recent Progress in Low-Loss Hollow-Core Anti-Resonant Fibers and Their Applications," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 26(4), pp. 1–12, 2020.
- [8] Tonucci R. J., Justus B. L., Campillo A. J., Ford C.E., "Nanochannel array glass," Science, pp. 258:783–5, 1992.
- [9] Knight J. C., Birks T. A., Russell P. S., Atkin D. M., "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding," Opt. Lett., 21:1547–9, 1996.
- [10] Cregan R. F., Mangan B. J., Knight J. C., Birks T. A., Russell P. S., Roberts P. J., Allan D. C., "Single-mode photonic band gap guidance of light in air," Science, 285:1537–9, 1999.
- [11] Gretlund J. S., Jakobsen C., Lyngso J. K., Simonsen H. R., US Patent No.US20100266251 A1, 2010.
- [12] Li Maochun, Zhao xiaoming, Ma Jun and Liang Hu, "Performance improvement analysis of hollow-core microstructure FOGs", Journal of Chinese Inertial Technology, 29(2), pp. 245-249, 2021.
- [13] H. Sakr, T. D. Bradley, G. T. Jasion, E. N. Fokoua, S. R. Sandoghchi, I. A. Davidson, A. Taranta, G. Guerra, W. Shere, Y. Chen, J. R. Hayes, D. J. Richardson, and F. Poletti, "Hollow Core NANFs with Five Nested Tubes and Record Low Loss at 850, 1060, 1300 and 1625nm", in 44th Optical Fiber Communication Conference (OFC), paper F3A.4, 2021.
- [14] Wang Y. Y., Wheeler N. V., Couny F., Roberts P. J., Benabid F., "Low loss broadband transmission in hypocycloid-core Kagome hollow-core photonic crystal fiber," Opt. Lett., 36(5), pp. 669-71, 2011.
- [15] A. N. Kolyadin, G. K. Alagashev, A. D. Pryamikov, L. Mouradian, A. Zeytunyan, H. Toneyan, A. F. Kosolapov, I. A. Bufetov, "Negative Curvature Hollow-core Fibers: Dispersion Properties and Femtosecond Pulse Delivery," Physics Procedia, 73, pp. 59-66, 2015.
- [16] Poletti F., "Nested antiresonant nodeless hollow core fiber," Opt. Express, 22(20), pp. 23807-28, 2014.
- [17] Belardi W., Knight J. C., "Hollow antiresonant fibers with reduced attenuation," Opt. Lett., 39(7), pp. 1853-6, 2014.
- [18] F. Benabid, J. C. Knight, G. Antonopoulos, P. S. J. Russell, "Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber," Science, 298(5592), pp. 399-402, 2002.
- [19] M. Michieletto, J. K. Lyngsø, C. Jakobsen, J. Laegsgaard, O. Bang, T. T. Alkeskjold, "Hollow-core fibers for high power pulse delivery," Opt. Express, 24(7), pp. 7103–7119, 2016.
- [20] H. C. H. Mulvad, S. Abokhamis Mousavi, V. Zuba, L. Xu, H. Sakr, T. D. Bradley, J. R. Hayes, G. T. Jasion, E. Numkam Fokoua, A. Taranta, S. U. Alam, D. J. Richardson, F. Poletti, "Kilowatt-average-power single-mode laser light transmission over kilometre-scale hollow-core fibre," Nat. Photonics, 16(6), pp. 448-453, 2022.
- [21] P. Uebel, M. C. Günendi, M. H. Frosz, G. Ahmed, N. N. Edavalath, J.-M. Ménard, P. S. J. Russell, "Broadband robustly single-mode hollow-core PCF by resonant filtering of higher-order modes," Opt. Lett., 41(9), pp. 1961-1964, 2016.

- [22] J. R. Hayes, E. N. Fokoua, M. N. Petrovich, D. J. Richardson, F. Poletti, S. R. Sandoghchi, T. D. Bradley, Z. Liu, R. Slavik, M. A. Gouveia, N. V. Wheeler, G. Jasion, Y. Chen, "Antiresonant Hollow Core Fiber With an Octave Spanning Bandwidth for Short Haul Data Communications," *J. Lightwave Technol.*, 35(3), pp. 437-442, 2017.
- [23] Cregan R. F., et al, "Single-mode photonic band gap guidance of light in air," *Science*, 285, pp. 1537-1539, 1999.
- [24] Smith C. M., et al, "Low-loss hollow-core silica/air photonic bandgap fibre," *Nature*, 424, pp. 657-659, 2003.
- [25] Yeh P., Yariv A., Marom E., "Theory of Bragg fiber," *J. Opt. Soc. Am.*, 68, pp. 1196-1201, 1978.
- [26] Johnson S. G., et al, "Low-loss asymptotically single-mode propagation in largecore OmniGuide fibers," *Opt. Express*, 9, 748-779, 2001.
- [27] John M. Fini, Jeffrey W. Nicholson, Brian Mangan, et al, "Polarization maintaining single-mode low-loss hollow-core fibres", *Nature Communications*, 5:5085, 2014.

Optical design of a fiber Mach-Zehnder interferometer based three-photon fiber optic gyroscope

1st Zhouxiang Wang
Tianjin Navigation Instruments
Research Institute
Tianjin, China
kxgrwzx@hotmail.com

2nd Jing Feng
Tianjin Navigation Instruments
Research Institute
Tianjin, China
1360741668@qq.com

3rd Wei Luo
Tianjin Navigation Instruments
Research Institute
Tianjin, China

4th Miao Yan
Tianjin Navigation Instruments
Research Institute
Tianjin, China

5th Weiqiang Sun
Tianjin Navigation Instruments
Research Institute
Tianjin, China

6th Bohan Liu
Tianjin Navigation Instruments
Research Institute
Tianjin, China

Abstract—Fiber optic gyroscope, as the core element of inertial navigation system, has important applications in both military and civil fields, and its accuracy directly determines the performance of inertial navigation system. With the increasing demand for high-precision and high-reliability navigation information, the requirements for fiber optic gyroscope accuracy are constantly increasing. However, the traditional scheme mainly relies on increasing the size of the fiber coil and the length of the fiber optic to improve the accuracy, which will bring negative impacts such as increasing the complexity of the system. In this paper, we propose a three-photon fiber optic gyroscope optical path scheme based on a fiber Mach-Zehnder interferometer, which utilizes the interference effect of the three-photon states in the fiber Mach-Zehnder interferometer to achieve a highly sensitive measurement of rotational speed. We describe the design principle of the optical path in detail and perform theoretical analysis. The scheme provides a new possible solution to further improve the accuracy of fiber optic gyroscope.

Index Terms—fiber optic gyroscope, Mach-Zehnder Interferometer, multi-photon interference

I. INTRODUCTION

Inertial navigation systems have the advantages of long range, high accuracy and long working life, thus becoming a guarantee for navigation in deep sea and satellite-free conditions. In particular, the inertial navigation system with fiber optic gyroscope as the core element, which is simple in structure, low in cost and easy to maintain, has replaced the traditional gyroscope in many existing systems, greatly improving the performance of the system and lowering and maintaining the cost of the system. At present, with the further improvement of navigation accuracy in deep sea and satellite-free conditions, the goal of manufacturing fiber optic gyroscope with higher accuracy and sensitivity is becoming more and more important.

The widely used interferometric fiber optic gyroscope consists of a broadband light source, fiber coupler, photodetector,

Y-shaped waveguide, and polarization-maintaining fiber sensing coil. The Sagnac effect is the theoretical foundation of modern fiber optic gyroscopes. When the gyroscope rotates, a phase difference ϕ_s is generated between two light waves propagating in the clockwise and counterclockwise directions within the fiber coil, which is proportional to the rotation rate Ω [1]. Previous studies have shown that the accuracy of fiber optic gyroscopes is determined by phase response and minimum phase resolution. Among them, the phase response, also known as the scaling factor, is proportional to the area surrounded by two light waves propagating in opposite directions, and inversely proportional to the wavelength. Therefore, traditional solutions improve the accuracy of fiber optic gyroscopes by increasing the fiber length of the sensing coil and increasing the winding diameter of the coil.

As the length and size of the fiber sensing coil continue to grow and increase, it has brought a series of negative impacts. For example, Shupe D M proposed that when there is a temperature disturbance with asymmetric position in the fiber sensing coil, two light waves propagating in opposite directions will generate a non-reciprocal phase shift when passing through this fiber at different times [2]. Similarly, asymmetric stress changes and complex physical environments on the carrier can also result in similar non-reciprocal phase shifts [3]. The above non-reciprocal phase shift will become more severe as the size of the fiber coil increases. In addition, increasing the size of the fiber coil can also increase the optical path loss, leading to a decrease in optical power, and such issues can in turn have a negative impact on accuracy. In summary, traditional interferometric fiber optic gyroscopes continue to encounter bottlenecks in improving accuracy, and new solutions need to be taken to further improve accuracy.

In 2019, the research team at the University of Vienna proposed for the first time a scheme for enhancing the

fiber optic gyroscope based on two-photon maximally path entanglement $|N00N\rangle$ state, and built a prototype of the principle [4]. It is predicted that the maximum path entangled state can be obtained after a heralded single-photon source passes through the Hong-Ou-Mandel interferometer, and the experimental results show that this scheme can realize the two-fold super-resolution, break through the relative intensity noise limit, and realize the ultra-high precision. However, for cases where $N > 2$, the above apparatus cannot obtain the corresponding $|N00N\rangle$ state [5]. In 2021, at the Applied Optics and Photonics China conference, our research group based on T Kobayashi et al. proposed a three-photon phase measurement scheme [6], which utilizes a three-photon state as the light source to enhance the detection sensitivity of a fiber optic gyroscope [7].

In this paper, we introduce a novel optical configuration for a three-photon fiber optic gyroscope based on a fiber Mach-Zehnder interferometer. This configuration leverages the interference phenomenon generated by the input three-photon states within the fiber Mach-Zehnder interferometer, resulting in a highly sensitive rotational speed measurement capability. A comprehensive explication of the principles of optical configuration is provided, accompanied by a rigorous theoretical analysis. The presented solution offers a fresh and viable avenue towards enhancing the accuracy of fiber optic gyroscopes.

II. CONCEPTS

A. Fundamental limit in precision phase measurement

Utilizing interferometers to measure phase delay for achieving precision measurements is a commonly employed technique that finds widespread utilization in fundamental research and practical applications. Research indicates that in an interferometer with a total average photon count of $\langle N \rangle$, the precision of phase measurement is constrained by the fundamental limit of quantum mechanics, known as the Heisenberg limit, given by $\Delta\phi > 1/\langle N \rangle$. For the maximal entanglement state $|N00N\rangle$, the precision of phase measurement can attain the Heisenberg limit of $\Delta\phi = 1/N$. Consequently, numerous laboratory experiments have been conducted by simultaneously injecting pairs of heralded single-photon source into a 50:50 beam splitter, thereby generating the maximal entanglement state with $N = 2$. The resulting output is subsequently fed into an interferometer for conducting precision measurement-like experiments. However, experimentally preparing maximal entanglement states with $N > 2$ poses challenges. It was not until 2004 that M. W. Mitchell et al. achieved super-resolution phase measurement experiments using a three-photon maximal entanglement state [9].

B. The noise of Fiber Optic Gyroscope

In engineering applications, the noise of fiber optic gyroscopes acts as a pivotal parameter constraining their deployment within high-precision domains. The noise characteristics of fiber optic gyroscopes exhibit resemblances to white noise, thereby prompting the utilization of white noise attributes in

engineering applications for their analysis, investigation, and mitigation. Typically, the random walk coefficient is employed to characterize the variance intensity inherent in the random walk process, representing the square root of the variance intensity pertaining to white noise. The random walk coefficient succinctly and directly encapsulates the noise profile of fiber optic gyroscopes, and is amenable for delineating the detection precision of such gyroscopes. Furthermore, it serves as a consequential metric in assessing the performance attributes of fiber optic gyroscopes.

The white noise in the fiber optic gyro consists of the relative intensity noise of the light source, the scattering noise of the photodiode, and the thermal noise of the detection circuit, which determine the detection accuracy of the fiber optic gyroscopes [10]. The total noise that eventually reaches the photodetector of fiber optic gyroscopes can be expressed as

$$\sigma_I^2 = \sigma_T^2 + \sigma_S^2 + \sigma_{RIN}^2 = \left(\frac{4KT}{R_L} + 2e\bar{i} + \frac{\bar{i}^2}{\Delta\nu} \right) B_e \quad (1)$$

where σ_I^2 , σ_T^2 , σ_S^2 , and σ_{RIN}^2 denote the variance of the total noise detected by the detector, the variance of the thermal noise of the detection circuit, the variance of the scattering noise, and the variance of the relative intensity noise of the light source, respectively. K is the Boltzmann constant, T is the thermodynamic temperature, $\Delta\nu$ is the spectral spreading, \bar{i} is the output photocurrent, and B_e is the detector response spectral width. Based on the relationship between the noise variance and the random wandering coefficient, equation (1) can be expressed as

$$\begin{aligned} RWC_I^2 &= RWC_T^2 + RWC_S^2 + RWC_{RIN}^2 \\ &= \frac{1}{36} \left(\frac{4KT}{R_L} + 2e\bar{i} + \frac{\bar{i}^2}{\Delta\nu} \right) B_e \end{aligned} \quad (2)$$

And the signal-to-noise ratio of the fiber optic gyroscope can be expressed as

$$SNR = \frac{\bar{i}^2}{\sigma_I^2} = \frac{\bar{i}^2}{\left(\frac{4KT}{R_L} + 2e\bar{i} + \frac{\bar{i}^2}{\Delta\nu} \right) B_e} \quad (3)$$

i.e., the higher the signal-to-noise ratio the smaller the random wandering coefficient.

In engineering applications, the signal-to-noise ratio of a fiber-optic gyroscope is influenced by shot noise at low photocurrent levels and by the relative intensity noise of the light source at higher photocurrent levels. To optimize performance, particularly with the use of a high-power and wavelength-stable broad-spectrum ASE light source, it's essential to mitigate light intensity noise. This enhancement is pivotal for achieving a higher signal-to-noise ratio, ultimately reducing the fiber-optic gyroscope's random walk coefficient.

III. EXPERIMENTAL METHODS

The schematic set up as shown in Fig. 1, it is mainly composed of fiber coupler, fiber beam splitter(FBS), fiber coil, fiber collimator and so on. The input light source for this

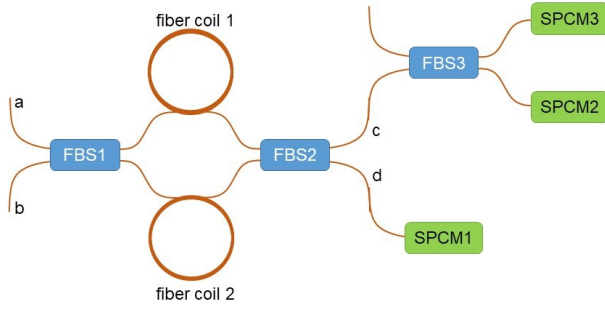


Fig. 1. The diagrammatic sketch of experiment setup.

apparatus is a three-photon state, $|1_a 2_b\rangle$ or $|2_a 1_b\rangle$. As the interference results for both input states are identical, this paper selects $|1_a 2_b\rangle$ state for illustrative purposes. Using the transfer matrix T_{FBS} to represent the action of the beam splitter as

$$T_{FBS} = \begin{pmatrix} -\sqrt{R} & \sqrt{1-R} \\ \sqrt{1-R} & \sqrt{R} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Where R is the reflectivity, with a value of $R = 2/3$.

When quantum state $|1_a 2_b\rangle$ is injected from the two incident ports of the first fiber beam splitter FBS1, the three photons interfere at the interface. The interfered three photons output from the two outlets of FBS1, which are connected to two identical fiber coils.

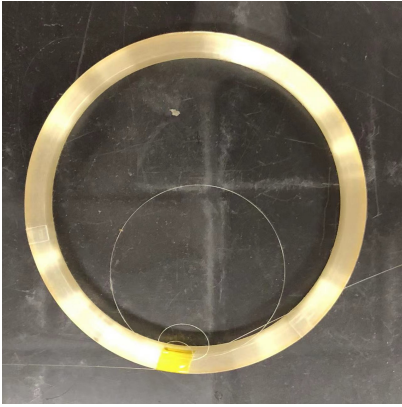


Fig. 2. Example of a fiber coil.

As shown in Fig. 2, the fiber coil functions as the angular rate sensing component in the interferometer, comprising a spool with fiber intricately wounding around it. In recent times, specialized fine polarization-maintaining fibers and fine single-mode fibers for sensing applications have been developed. In comparison to the fibers conventionally used for communication, these fine fibers performance well in terms of bending, enabling the design of the significantly compact fiber optic gyroscopes. A multitude of techniques exist for the winding of the fiber optic coil. To ensure symmetrical arrangement and suppress the Shupe error, the symmetric winding approach is commonly employed. Among these techniques, the quadrupole

symmetrical winding method involves initiating from the mid-point of the fiber, winding one layer around the spool with the fiber on one side, followed by the addition of two layers with the fiber on the other side, and then repeating the process in a alternating manner, sequentially winding two layers with the fiber on the other side. Additionally, the introduction of a thermally insulating layer with superior heat insulation properties around the exterior of the fiber coil serves to suppress Shupe error by attenuating the impact of temperature variation. The transfer matrix of fiber coils is represented as

$$T_{coil} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i(\phi_\Omega + \phi_0)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

where ϕ_Ω is the phase delay introduced by the rotation speed Ω and is proportional to it. ϕ_0 is an adjustable phase delay for feedback adjustment.

The outputs of the two fiber loops are connected to the two inputs of the FBS2, which interferes again at the FBS2. And the transmission matrix of FBS2 is the same as that of FBS1. Mark the two outputs of FBS2 as port c and port d respectively, and calculate the propagation matrix. The annihilation operator output from port c and port d can be calculated from the transfer matrix, i.e.

$$\begin{aligned} \hat{c} &= \sqrt{R(R-1)} (e^{i\Phi} - 1) \hat{a} + (1 - R + R e^{i\Phi}) \hat{b} \\ \hat{d} &= \sqrt{R(R-1)} (e^{i\Phi} - 1) \hat{b} + (1 - R + R e^{i\Phi}) \hat{a} \end{aligned} \quad (6)$$

Where $\Phi = \phi_\Omega + \phi_0$. The FBS3 is connected to port c, splitting the output in two and connecting each to a single photon counting module (SPCM); while port d is directly connected to a SPCM for detecting $|2_c 1_d\rangle$ state. Connecting SPCM1, SPCM2 and SPCM3 to the coincidence counting device, the conformity counting result can be obtained by the 3rd order correlation function, i.e.

$$\Gamma = \langle 1_d 2_c | \hat{d}^* \hat{c}^* \hat{c} \hat{c} \hat{d} | 2_c 1_d \rangle \quad (7)$$

Substituting equation (6) into equation (7) yields

$$\Gamma \propto (1 - \cos 3\Phi) \quad (8)$$

From equation (8), it can be seen that the oscillation period of the correlation curve is one-third of that of classical light as the source, which means that the resolution is three times higher than that of classical light.

This apparatus uses two fiber coils to form a fiber Mach-Zehnder interferometer, which greatly reduces the crosstalk and improves the interoperability of the interferometer. In addition, the SPCM1 in figure 1. can be replaced with a set up combination consistent with the same in port c, i.e., a FBS connected to two other SPCM, so that the entire apparatus achieves the highest interoperability.

REFERENCES

- [1] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope[M]. Artech house, 2022.
- [2] Shupe D M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer[J]. Applied optics, 1980, 19(5): 654-655.
- [3] Bergh R, Lefevre H, Shaw H. An overview of fiber-optic gyroscopes[J]. Journal of Lightwave Technology, 1984, 2(2): 91-107.

- [4] Fink M, Steinlechner F, Handsteiner J, et al. Entanglement-enhanced optical gyroscope[J]. *New Journal of Physics*, 2019, 21(5): 053010.
- [5] Mitchell M W, Lundeen J S, Steinberg A M. Super-resolving phase measurements with a multiphoton entangled state[J]. *Nature*, 2004, 429(6988): 161-164.
- [6] Wang H, Kobayashi T. Phase measurement at the Heisenberg limit with three photons[J]. *Physical Review A*, 2005, 71(2): 021802.
- [7] Wang Z, Zhao X, Liu B, et al. Rotational speed measurement with three photon interference[C]//AOPC 2021: Optical Sensing and Imaging Technology. SPIE, 2021, 12065: 778-783.
- [8] Heitler W. *The Quantum Theory of Radiation*, 3rd edn. Clarendon[J]. 1954.
- [9] Mitchell M W, Lundeen J S, Steinberg A M. Super-resolving phase measurements with a multiphoton entangled state[J]. *Nature*, 2004, 429(6988): 161-164.
- [10] Gui-cai Z, Xiao-qing L, Kai L, et al. Modification and Experimental Study of Random Walk Coefficient Model of Fiber Optic Gyroscope[J]. *Piezoelectricity and Acousto-optic*, 2009, 4: 12-14. Na yonglin, Wu wanling. Research on Relative Intensity Noise Suppression of Fiber Optic Gyroscope Based on SOA. *Navigation and Timing*.

И. С. МОЖАРОВСКИЙ

(Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
Владивостокский государственный университет, Владивосток)**ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ВИРТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПОДСИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА БЕНЗИНА**

Рассматриваются вопросы построения моделей виртуального анализа для подсистем управления сложным технологическим процессом вторичной переработки бензина, которые позволяют предсказывать качество выпускаемой продукции в режиме реального времени, что дает возможность оперативно-го управления сложным процессом производства.

Введение. В современном производстве бензина используется виртуальный анализ качества выходного продукта, это дает возможность оперативно управлять технологическим процессом (ТП) для предотвращения брака, а также следить за показателями качества выпускаемой продукции в режиме реального времени. Такой подход к управлению производством существенно упрощает его и позволяет выпускать продукцию заданного качества. Однако, построение математических моделей технологического процесса переработки бензина, способных адекватно прогнозировать качество выпускаемого продукта является достаточно сложной задачей. Так как на него влияет большое количество различных параметров, зачастую скрытых и неопределенных, это накладывает ограничения на такие модели и требует дополнительных решений при их создании.

ТП переработки бензина является достаточно сложным, для управления им требуется определять большое количество параметров и показателей работы ректификационных колонн. Он состоит из комплекса различного оборудования, связанного в общую систему переработки нефти. Поэтому для управления таким процессом требуется создавать не одну математическую модель прогнозирования качества, а целую сеть, которая позволит адекватно предсказать качество выпускаемой продукции. Каждая из которых может быть построена на основе различных методов моделирования в связи с особенностью прогнозируемого параметра. Поэтому создание самих моделей и в целом комплекса виртуального анализа промышленного производства бензина является сложной задачей, которую до сих пор решают и оптимизируют.

Для ускорения процесса построения математических моделей для сложных технологических объектов следует применять метод оценки индекса структурной идентифицируемости основанный на алгоритме условных чередующихся математических ожиданий (alterative conditional expectations – ACE) [1, 2].

Построение моделей виртуального анализатора. На рис. 1 схематично представлен процесс стабилизации бензина, который состоит из трех последовательных ректификационных колонн.

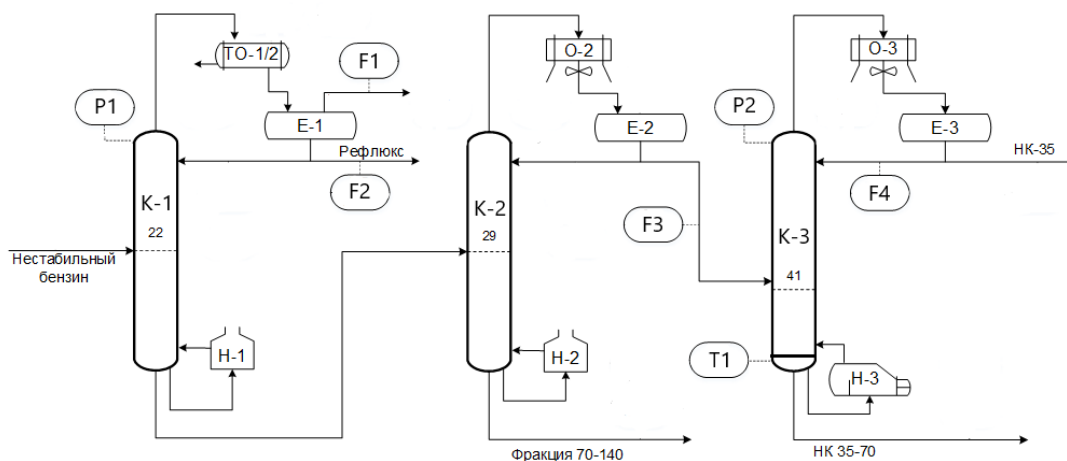


Рис. 1. Схема блока стабилизации бензина и вторичной переработки бензина

Ставится задача создания математических моделей для оценки качества выходного продукта по концентрации суммы углеводородов C1-C4 во фракции НК 35-70 блока стабилизации и вторичной переработки бензина. Для этого использовались два метода моделирования: основанный на нейронной сети обратного распространения ошибки [3] и основанный на использовании алгоритма ACE [4].

Из приведенной схемы на рис. 1, были отобраны значимые параметры, которые используются в модели для оценки качества выходного продукта фракции НК 35-70 (табл. 1).

Таблица 1

Описание переменных входящих в модель

Переменные		Описание
Вход	x1	P1 – давление верха колонны К-1
	x2	F2 – дистиллят колонны К-1
	x3	P2 – давление верха колонны К-3
	x4	T1 – температура низа колонны К-3
	x5	F4 – поток рефлюкса колонны К-3
	x6	F3 – поток дистиллята из колонны К-2 в колонну К-3
Выход	y	Сумма C1-C4 компонент во фракции НК 35-70, колонны К-3

Обучающая, валидационная и тестовая выборки были сформированы на основе данных, полученных с промышленного объекта. В итоге выборки имеют размер 400x7, 30x7, 30x7, соответственно.

С использованием выше описанных выборок, были построены математические модели. Модель НС, построенная на основе нейронной сети обратного распространения ошибки. Модель ACE, построенная на основе алгоритма условных чередующихся математических ожиданий. Результаты моделирования представлены на рис. 2, лабораторный анализ (ЛА) и в табл. 2.

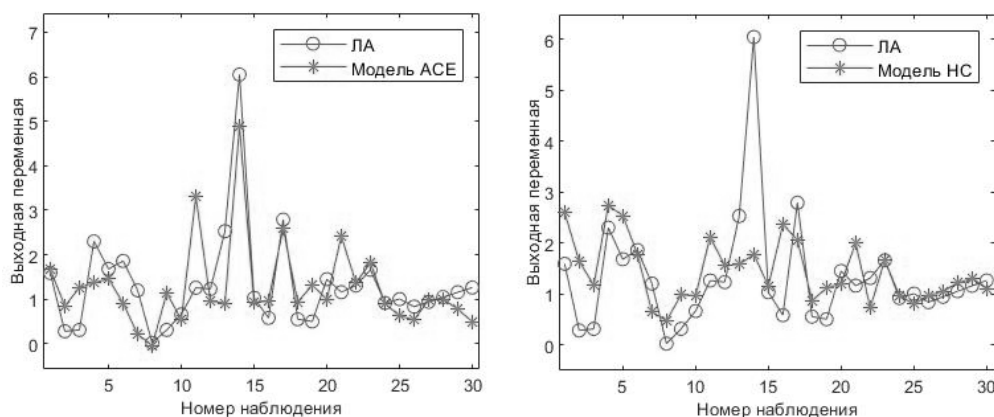


Рис. 2. Результаты моделирования

Таблица 2

Описание переменных входящих в модель

Критерий	Модель ACE	Модель НС
R2 – коэффициент детерминации	0,5278	0,1256
RMSE – среднеквадратичное отклонение	0,7478	1,0176

По представленным на рис. 2 и табл. 2 результатам можно отметить, что точность полученных моделей не удовлетворяют требованиям, возможно с отсутствием репрезентативности в экспериментальной выборке данных. Необходимо проводить дополнительные исследования в области представления данных для моделирования. Так как выбранные методы моделирования хорошо подходят для построения моделей при достаточно репрезентативной выборке. Отметим что модель, построенная с помощью алгоритма ACE дает заметно лучше результат в сравнении с моделью, построенной на основе нейронной сети.

Заключение. Благодаря проведенному исследованию было показано, что процесс построения прогнозирующих моделей для подсистем управления технологическим процессом производства бензина является трудоемкой задачей, которую требуется решать комплексно.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Breiman, L.** Estimating optional transformations for multiple regression and correlation / **L. Breiman, J. Friedman** // Journal of the American Statistical Association. – 1985. – Vol. 80. – P. 580-598.
2. Анализ идентифицируемости нелинейных объектов управления слабо формализованной структуры / Г. Б. Диго, **Н. Б. Диго, А. Ю. Торгашов, И. С. Можаровский** // Информатика и системы управления. – 2012. – № 3 (33). – С. 34-46.
3. **Ali J. K.** Neural networks: a new tool for the petroleum industry? // European petroleum computer conference. – OnePetro, 1994.
4. **Mozharovsky, I. S.** Predictive modeling of mass-transfer of plant using an algorithm of alternating conditional expectations / **I. S. Mozharovsky, S. A. Samotylova, A. Yu. Torgashov** // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2020. – Vol. 12, No. 6. – P. 915-925.

I.S. Mozharovskii (Institute of Automation and Control Process FEB RAS, Vladivostok State University, Vladivostok).
Model design of virtual analysis for subsystems of control of the technological process of gasoline production

Abstract. The issues of building virtual analysis models for control subsystems of a complex technological process of gasoline recycling are considered, which allow predicting the quality of products in real time, which makes it possible to quickly control a complex production process.

С. В. СТАБРОВ, С. А. ШЕВЛЯГИНА

(Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН,
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток)

А. А. ПЛОТНИКОВ

(Дальневосточный федеральный университет, Владивосток)

**АНАЛИЗ СТРУКТУР УПРАВЛЕНИЯ МАССООБМЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ОБЪЕКТА С ПАРЦИАЛЬНЫМ КОНДЕНСАТОРОМ**

В докладе исследуются две различные структуры управления массообменным технологическим объектом с парциальным конденсатором. Приводится их анализ управляемости на основе матрицы относительных коэффициентов усиления.

Введение. Ректификационные установки используются примерно для 95% всех процессов разделения жидкостей в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. В большинстве практических случаев для ректификационных установок используются полные конденсаторы. Однако, при разделении компонентов с коэффициентами летучести, существенно отличающихся друг от друга, необходимо выдерживать высокое давление верха колонны при работе с полным конденсатором в отличие от парциального конденсатора [1]. Использование парциального конденсатора позволяет снизить материальные и энергетические затраты на охлаждение продукта в конденсаторе [2]. В докладе исследуются две альтернативные структуры управления (СУ) массообменного технологического объекта (МТО) с парциальным конденсатором при различных условиях: (1) уровень в емкости регулируется расходом жидкого дистиллята и (2) уровень в емкости регулируется расходом орошения. Предпочтительная СУ будет зависеть от целей контроля всего процесса.

Системы управления массообменного технологического объекта с парциальным конденсатором. Для ректификационных установок с парциальным конденсатором дистиллят удаляется из емкости в виде потока паров и жидкости. Поскольку поток пара не влияет на уровень в емкости, его нельзя напрямую использовать для контроля уровня. Кроме того, на давление верха колонны будет оказывать влияние не только теплоотвод конденсатора, но и расход парового дистиллята. Рассмотрим следующие структуры управления (рис. 1): (а) для контроля температуры верха колонны используется количество возвращаемой в колонну флегмы (орошения). Уровень в емкости регулируется расходом жидкого дистиллята и; (б) уровень в емкости регулируется расходом орошения.

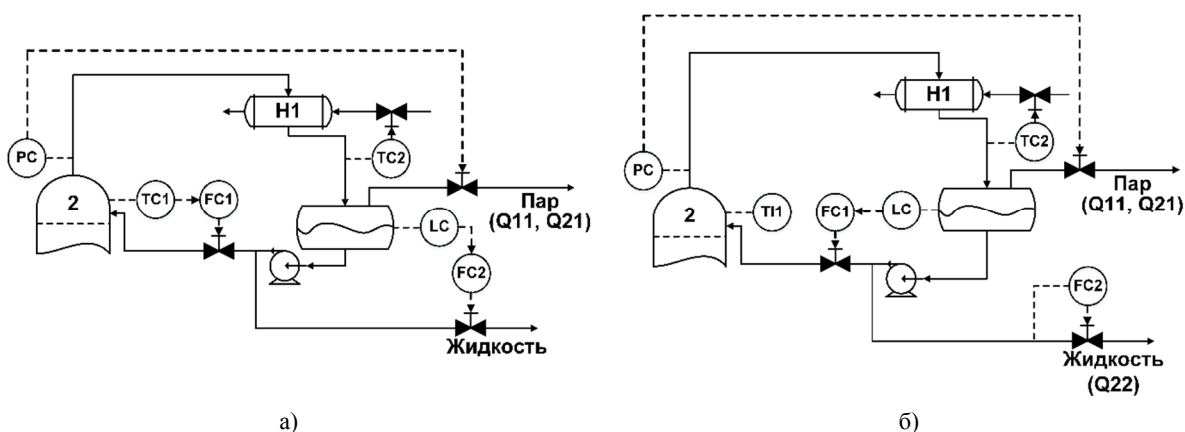


Рис. 1. Системы управления МТО с парциальным конденсатором: а) СУ1 – уровень в емкости регулируется расходом жидкого дистиллята; б) СУ2 – уровень в емкости регулируется расходом орошения.

Давление регулируется расходом парообразного дистиллята. Разработка систем управления и их настройка для МТО с парциальным конденсатором намного сложнее, чем для

установок с полным конденсатором из-за сильного взаимодействия между контурами управления давлением, температуры и уровня.

Передаточные функции для двух СУ были получены путем проведения пошагового тестирования (размер шага составлял $\pm 1\%$ от установившегося значения) на промышленной установке с помощью Profit Design Studio. В таблице 1 представлена матрица передаточных функций процесса.

Таблица 1

Передаточные функции для двух структур управления

Структура управления 1			
Управляемые переменные (CV)	Управляющие переменные (MV)		
	Температура верха колонны (TC1)	Температура конденсатора HI (TC2)	Давление верха колонны (PC)
Расход парового дистиллята (Q11)	0	$\frac{22.2(23.1s + 1)}{54.2s^2 + 14.7s + 1} e^{-0s}$	$\frac{-40.3(27.4s + 1)}{5.61s^2 + 4.7s + 1} e^{-0s}$
Качество парового дистиллята (Q21)	$\frac{0.08(16.1s + 1)}{56.8s^2 + 15.1s + 1} e^{-0s}$	$\frac{0.036(8.2s + 1)}{18.9s^2 + 4.3s + 1} e^{-0s}$	$\frac{-0.001}{15s + 1} e^{-0s}$
Отношение орошения к сырью	$\frac{-0.014}{0.8s + 1} e^{-0s}$	0	0
Структура управления 2			
Управляемые переменные (CV)	Управляющие переменные (MV)		
	Температура конденсатор HI (TC2)	Давление верха колонны (PC)	Расход жидкого дистиллята (FC2)
Расход парового дистиллята (Q11)	$\frac{140}{12s + 1} e^{-0s}$	$\frac{-113}{28.3s + 1} e^{-0s}$	$\frac{-0.04}{8.2s + 1} e^{-0s}$
Качество парового дистиллята (Q21)	$\frac{0.03}{10s + 1} e^{-0s}$	$\frac{-0.005}{61.2s + 1} e^{-0s}$	$\frac{-1.7(-578.3s + 1)}{36s^3 + 12s^2 + s} e^{-25s}$
Качество жидкого дистиллята (Q22)	$\frac{-0.0003(-565.9s + 1)}{56.5s^3 + 15s^2 + s} e^{-9s}$	0	$\frac{0.001}{s + 1} e^{-0s}$

Для анализа структур управления, а также для сравнения управляемости различных схем управления ректификационной установки вычислена матрица относительных коэффициентов усиления (Λ) [3] для системы 3×3 :

$$\Lambda_{CV1} = \begin{pmatrix} 0 & -0.064 & 1.064 \\ 0 & 1.064 & -0.064 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \Lambda_{CV2} = \begin{pmatrix} 0.019 & 0.981 & 0 \\ -0.092 & 0.019 & 1.073 \\ 1.073 & 0 & -0.073 \end{pmatrix}.$$

Предпочтительна та СУ, у которой элементы Λ близки к единице. Сумма отклонений всех диагональных элементов Λ от единицы [3] для исследуемых структур управления составляет $\Delta_{\Lambda_{CV1}} = 2.06$ и $\Delta_{\Lambda_{CV2}} = 2.89$.

Заключение. На основании анализа управляемости СУ1 может быть выбрана как наилучшая. Однако, анализ управляемости не дает полного представления о динамическом поведении процесса и в данном случае не дает однозначных результатов. Следует отметить, что анализ управляемости следует рассматривать как необходимое, чем достаточное условие для выбора структуры управления.

Работа проводилась при частичной поддержке гранта Президента РФ № МК 1994.2022.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Luyben W.L.** Realistic models for distillation columns with partial condensers producing both liquid and vapor products. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012. Vol. 51. №. 24. P. 8334-8339.

2. **Luyben W.L.** Alternative control structures for distillation columns with partial condensers. *Industrial & engineering chemistry research*. 2004. Vol. 43. №. 20. P. 6416-6429.
3. **Gross F., Baumann E., Geser A., Rippin D.W.T., Lang L.** Modelling, simulation and controllability analysis of an industrial heat-integrated distillation process. *Computers & chemical engineering*. 1998. Vol. 22(1-2). P. 223-237.

S.V. Stabrov, S.A. Shevlyagina (Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok), (Far Eastern Federal University, Vladivostok), A.A. Plotnikov (Far Eastern Federal University, Vladivostok). **Analysis of control structures of a mass-transfer plant with a partial condenser.**

Abstract. In the report two different control structures of a mass-transfer plant with a partial condenser is studied. Analysis of controllability based on the steady-state relative gain array is presented.

УДК 621.391.172

О. А. СТЕПАНОВ, Ю. А. ЛИТВИНЕНКО, А. М. ИСАЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕКУРРЕНТНЫХ АЛГОРИТМОВ КАЛМАНОВСКОГО ТИПА В ЗАДАЧАХ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

С использованием ранее разработанной методики проведен сравнительный анализ рекуррентных алгоритмов калмановского типа при их использовании для решения задачи коррекции навигационной системы по маякам-ответчикам.

Введение. Многие задачи, связанные с обработкой избыточной измерительной информации, носят нелинейный характер. Для их решения в рамках стохастического подхода разработчики используют различные субоптимальные алгоритмы [1–6]. При этом для выбора конкретного алгоритма проводят их сопоставление, выполняемое, как правило, путем моделирования [7, 8]. В [9] предложена методика, позволяющая на основе результатов проведенного моделирования количественно оценивать точность, состоятельность и вычислительную сложность разрабатываемых алгоритмов. В настоящей работе на примере задачи коррекции навигационной системы счисления с использованием этой методики проводится сопоставление кратко описываемых далее рекуррентных алгоритмов калмановского типа (АКТ).

Постановка задачи. Рассматривается задача нелинейной дискретной фильтрации n -мерного случайного вектора x_k , описываемого с помощью формирующего фильтра [8]:

$$x_k = f_k(x_{k-1}) + \Gamma_k w_k, \quad (1)$$

по m -мерным измерениям следующего вида

$$y_k = h_k(x_k) + v_k, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где k - индекс дискретного времени; x_0 - n -мерный случайный гауссовский вектор с функцией плотности распределения вероятности $p(x_0) = N(x_0; \bar{x}_0, P_0^x)$ w_k - n_w -мерный центрированный дискретный гауссовский белый шум, независимый от x_0 , с известной матрицей ковариаций Q ; Γ_k - известная матрица размерности $n \times n_w$; v_k - m -мерный центрированный дискретный гауссовский белый шум, независимый от x_0 и w_k , с известной матрицей ковариации R . Особенностью рассматриваемой задачи является тот факт, что входящие в уравнения (1) и (2) нелинейные вектор-функции $f_k(\bullet)$, $h_k(\bullet)$ представляют собой полиномы относительно компонент вектора состояния либо являются как минимум дважды дифференцируемыми функциями общего вида, допускающие такое приближение. Известно, что оптимальная в среднеквадратическом смысле оценка вектора состояния при решении задачи фильтрации в рамках байесовского подхода определяется в виде математического ожидания, соответствующее апостериорной плотности распределения вероятностей $p(x_k / Y_k)$, где $Y_k = (y_1, y_2, \dots, y_k)^T$. В качестве расчетной текущей характеристики точности при этом может быть использована матрица ковариаций ошибок оптимального оценивания [1–5]. Поскольку, как правило, для нелинейных задач затруднительно, а в ряде случаев невозможно, реализовать алгоритм нахождения оптимальной оценки с использованием бортовых вычислителей, разрабатываются различного рода упрощенные (субоптимальные) алгоритмы. При этом стремятся, чтобы эти алгоритмы обеспечивали: получение оценки, близкой по точности к оптимальной; свойство состоятельности, под которым понимается адекватность расчетной характеристики точности, согласованной с ее действительными значениями [14]; возможность реализации, не требующей значительного объема вычислений. Из сказанного естественным образом вытекает необходимость методики, позволяющей проводить сопоставление разрабатываемых субоптимальных алгоритмов с учетом перечисленных выше признаков. Такая

методика предложена в [9]. Она предполагает многократное моделирование реализаций оцениваемых последовательностей (1) и соответствующих им измерений (2) и построение оценок сопоставляемых алгоритмов. Располагая этими данными, вычисляются: выборочные значения матрицы ковариаций G_k , характеризующей действительные ошибки оценивания и среднее значение расчетной матрицы ковариаций \tilde{G}_k . С их использованием далее рассчитываются коэффициенты ξ_k^{sub} , ζ_k^{sub} , позволяющие количественно оценить точность и состоятельность сопоставляемых алгоритмов.

$$\xi_{ik}^{sub} = \frac{\sqrt{[G_k^{sub}]_{i,i}} - \sqrt{[G_k^*]_{i,i}}}{\sqrt{[G_k^*]_{i,i}}}, \quad \zeta_{ik}^{sub} = \frac{\sqrt{[\tilde{G}_k^{sub}]_{i,i}} - \sqrt{[G_k^{sub}]_{i,i}}}{\sqrt{[G_k^{sub}]_{i,i}}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где $[G_k^{sub}]_{i,i}$ и $[\tilde{G}_k^{sub}]_{i,i}$ – диагональные элементы безусловных и усредненных расчетных матриц ковариаций субоптимальных алгоритмов, а $[G_k^*]_{i,i}$ – диагональные элементы безусловных матриц ковариаций, соответствующих одному из алгоритмов, относительно которого проводится сопоставление по точности, называемого далее базовым. Кроме того, по формуле $T^{sub} = \frac{\tau^{sub} - \tau^*}{\tau^*}$ вычисляется коэффициент T^{sub} , с помощью которого можно

приблизительно оценить вычислительную сложность алгоритмов. В этом соотношении $\tau^{sub} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L t^{sub}$, $\tau^* = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L t^*$, t^{sub} – время, затраченное вычислителем на решение задачи оценивания с использованием анализируемых субоптимальных алгоритмов, а t^* – время, соответствующее алгоритму, требующему минимального времени среди всех сопоставляемых алгоритмов.

В работе эта методика иллюстрируется на примере ее использования для сопоставления описываемых далее алгоритмов при решении задачи коррекции навигационной системы по маякам-ответчикам.

Сопоставляемые алгоритмы. В работе рассматриваются рекуррентные алгоритмы, получившие наименование алгоритмов калмановского типа и обладающие двумя отличительными особенностями. Во-первых, апостериорная плотность $p(x_{k-1} / Y_{k-1})$ на каждом шаге заменяется ее гауссовской аппроксимацией, описываемой с помощью вырабатываемых в алгоритме оценки $\hat{x}_k(Y_k)$ и соответствующей ей расчётной матрицы ковариаций P_k , т.е. $p(x_{k-1} / Y_{k-1}) \approx N(x_{k-1}; \hat{x}_{k-1}, P_{k-1})$. Вторая особенность, определяется тем, что обработка текущего измерения осуществляется исходя из идеологии построения линейного оптимального алгоритма (ЛОА) [3, 15]. Для этого реализуется специальная процедура, подробно описанная в [8]. Суть этой процедуры заключается в формировании составного вектора $z_k = [x_k \ y_k]^T$ и вычислении для него математического ожидания и матрицы ковариаций. Рассматриваемые субоптимальные алгоритмы представляют собой два различных класса АКТ. В одном из них вычисление необходимых величин осуществляется на основе аппроксимации нелинейных вектор-функций $f_k(\bullet)$ и $h_k(\bullet)$ в (1) и (2) путём разложения их в ряд Тейлора с сохранением слагаемых того или иного порядка: для обобщенного фильтра Калмана (ЕКФ) – первого порядка [1–8], а для полиномиального фильтра (SOPF) - второго порядка [4–6, 8–13]. Искомые моменты в этом случае находятся с использованием формулы для чётных моментов гауссовых случайных величин и того факта, что нечётные центральные моменты равны нулю. Второй класс АКТ представляет ансамбльный фильтр Калмана (УКФ), уравнения динамики (1) и измерений (2) в котором напрямую не аппроксимируются, а при отыскании необходимых

моментов используется так называемая процедура ансцентного преобразования [10, 11], для реализации которой не требуется нахождения производных.

Задача коррекции навигационной системы по маякам-ответчикам. При сопоставлении рассматриваемых алгоритмов применительно к задачам, связанным с обработкой навигационной информации, была выбрана задача уточнения показаний навигационной системы по маякам-ответчикам [1, 17]. При проведении предсказательного моделирования предполагалось, что морской подвижный объект (МПО) движется в локальной прямоугольной декартовой системе координат Ox_1x_2 , расположенной в плоскости горизонта. Также считалось, что координаты МПО вырабатываются навигационной системой счисления по показаниям компаса и относительного лага. При этом в дискретные моменты времени проводятся измерения дальностей $y_{1,k}, y_{2,k}, y_{3,k}$ до трёх маяков ответчиков, координаты которых считались известными. Вводя 4-х мерный вектор $x_k = \begin{bmatrix} x_{1,k} & x_{2,k} & x_{3,k} & x_{4,k} \end{bmatrix}^T$, в котором $x_{1,k}, x_{2,k}$ – истинные координаты объекта, а $x_{3,k} = \Delta V_k, x_{4,k} = \Delta K_k$ – ошибки определения скорости и курса, которые на интервале решения задачи считались постоянными, поведение динамической системы можно описать как $x_k = f_k(x_{k-1}) + u_k$, где $f_k(x_{k-1})$ и u_k имеют вид [17]:

$$f_k(x_{k-1}) = \begin{bmatrix} x_{1,k-1}^{МПО} - \tilde{V}_{k-1} \Delta t \cos(\tilde{K}_{k-1}) x_{4,k-1} - \sin(\tilde{K}_{k-1}) \Delta t x_{3,k-1} + \cos(\tilde{K}_{k-1}) \Delta t x_{3,k-1} x_{4,k-1} \\ x_{2,k-1} + \tilde{V}_{k-1} \Delta t \sin(\tilde{K}_{k-1}) x_{4,k-1} - \cos(\tilde{K}_{k-1}) \Delta t x_{3,k-1} - \sin(\tilde{K}_{k-1}) \Delta t x_{3,k-1} x_{4,k-1} \\ x_{3,k-1} \\ x_{4,k-1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$u_k = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{1,k-1} \sin(\tilde{K}_{k-1}) \Delta t & \tilde{V}_{1,k-1} \cos(\tilde{K}_{k-1}) \Delta t & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$, а \tilde{V}_k и \tilde{K}_k – показания компаса и лага на шаге k . Измерения дальности до маяков можно представить в виде:

$$y_{i,k} = \sqrt{(x_{1,k} - x_1^{im})^2 + (x_{2,k} - x_2^{im})^2} + v_{i,k}, \quad i = \overline{1..3}, \quad (5)$$

где x_1^{im}, x_2^{im} – известные координаты i -го маяка; $v_{i,k}$ – погрешности измерений, представляющие собой дискретные гауссовские центрированные белые шумы с дисперсиями $(\sigma_y)^2$. Принимая во внимание (5), нетрудно для трехмерного вектора измерений конкретизировать выражение (2) применительно к рассматриваемой задаче.

При построении алгоритмов нелинейная функция, входящая в (5) раскладывалась в ряд с точностью до членов второго порядка малости. Это, наряду с полиномиальным характером функции (4) обеспечивало возможность использования обсуждаемых в настоящей работе EKF и SOPF. Соответствующие соотношения для их построения были взяты из работы [17]. При вычислении коэффициентов ξ_k^{sub} в качестве базового алгоритма использовался итерационный обобщённый фильтр Калмана (Iterated Extended Kalman Filter - IEKF) [1,3,4,17]. Как было показано в [17], для рассматриваемой задачи IEKF, практически совпадает с точностью оптимального алгоритма и при этом он является состоятельным.

Необходимое моделирование выполнялось при следующих параметрах [17]: известные координаты маяков $x_1^{1m} = -960, x_2^{1m} = 250, x_1^{2m} = -1000, x_2^{2m} = 0, x_1^{3m} = -960, x_2^{3m} = -250$, начальные координаты МПО $x_{1,0}^{ucm} = 0, x_{2,0}^{ucm} = 0$, угол курса $K = 5^\circ$, скорость в продольном направлении $V = 3 \text{ м/с}$, время моделирования $t = 50 \text{ с}$, шаг дискретизации $\Delta t = 1 \text{ с}$.

На рис. 1, 2 в качестве примера представлены графики коэффициентов $\xi_k^{sub}, \zeta_k^{sub}$, рассчитанных для первых двух компонент вектора-состояния. Синий цвет и цифра 1 соответствуют алгоритму EKF, чёрный и цифра 2 – SOPF, а пурпурный и цифра 3 – UKF.

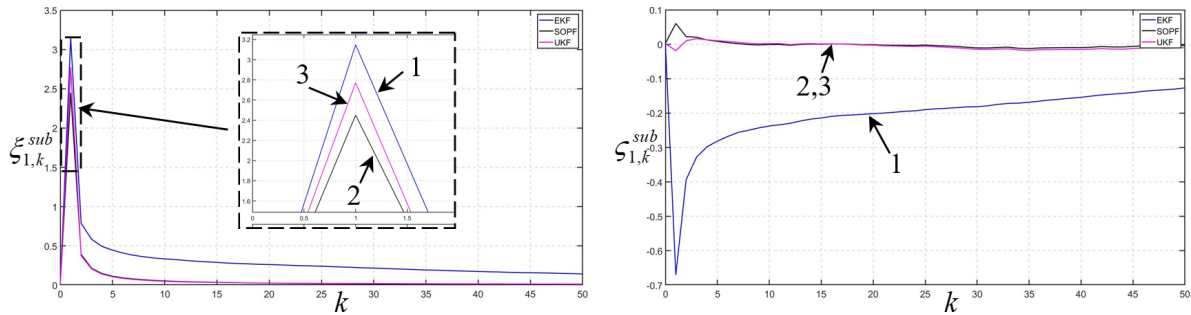


Рис. 1. Коэффициенты $\xi_{1,k}^{sub}$, $\zeta_{1,k}^{sub}$ для первой компоненты вектора-состояния (координаты $x_{1,k}$).

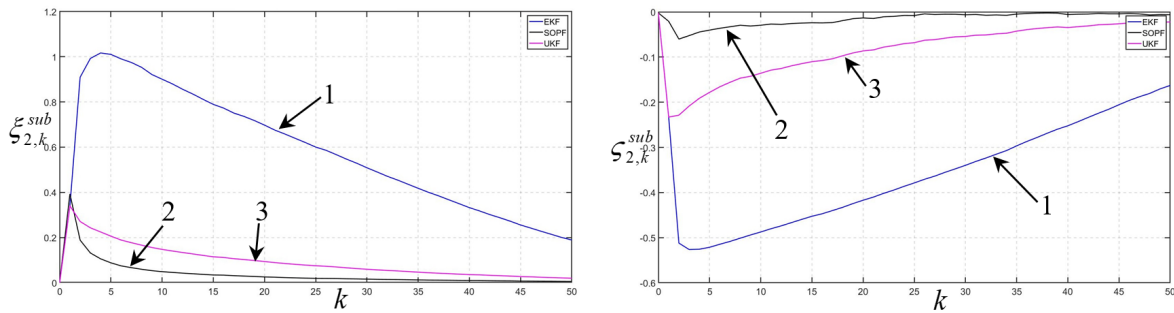


Рис. 2. Коэффициенты $\xi_{2,k}^{sub}$, $\zeta_{2,k}^{sub}$ для второй компоненты вектора-состояния (координаты $x_{2,k}$).

Лучший среди сопоставляемых субоптимальных алгоритмов, как по точности, так и по состоятельности оказывается SOPF. Аналогичные количественные характеристики UKF близки к $\xi_{3,k}^{sub}$, $\zeta_{3,k}^{sub}$ для SOPF в части оценивания $x_{1,k}$, ΔV_k и ΔK_k . Однако при оценивании $x_{2,k}$ снижение точности UKF по сравнению с точности IEKF составляет более 10 % первые 15 секунд работы фильтра. Также более чем на 10% отличаются соответствующие диагональные элементы действительной и усреднённой расчётной матрицы ковариаций UKF. Для SOPF же через пять секунд работы фильтра отличия точности и состоятельности не превышают 10%. Наименьшую точность и состоятельность показывает EKF при оценивании всех компонент вектора-состояния.

Оценка быстродействия алгоритмов проводилась с использованием процессора QuadCore Intel Core i5-4690K с номинальной тактовой частотой 3,8 ГГц. При этом коэффициенты T^{sub} рассчитывались для всех субоптимальных алгоритмов, включая IEKF.

Т а б л и ц а 1 .

	EKF	SOPF	UKF	IEKF
T^{sub}	-	8.85	45.48	1.78

Результаты расчёта T^{sub} для задачи коррекции навигационной системы по маякам-ответчикам, приведённые в таблице 1, показали, что среди субоптимальных алгоритмов, построенных исходя из идеологии ЛОА, наиболее простым в вычислительном плане является EKF, а наиболее сложным – UKF. При этом IEKF, точность которого в рассматриваемой задаче сопоставима с точностью оптимального алгоритма, проще в вычислительном плане, чем SOPF и UKF.

Заключение.

1. Предложенная ранее методика сопоставления субоптимальных алгоритмов проиллюстрирована на примере ее использования для сопоставления точности, состоятельности и вычислительной сложности ансцентного фильтра Калмана, обобщенного фильтра Калмана и полиномиального фильтра второго порядка при решении задачи коррекции навигационной системы по маякам-ответчикам.

2. При решении задачи коррекции навигационной системы по маякам-ответчикам лучшим среди сопоставляемых субоптимальных алгоритмов как по точности, так и по состоятельности

оказался SOPF, отличия которого по перечисленным характеристикам от IEKF не превышают 10%. UKF же при оценивании второй компоненты вектора-состояния демонстрирует снижение точности и состоятельности более чем на 10%, первые 15 секунд работы фильтра. Наименьшую точность и состоятельность при оценивании всех компонент вектора-состояния показывает EKF. Полученные результаты сопоставления вычислительной сложности аналогичны тем, которые получены в скалярном примере.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00626, <https://rscf.ru/project/23-19-00626/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Jazwinski A. H.** Stochastic process and filtering theory. New York: Academic Press, 1970.
2. **Gelb A.** Applied Optimal Estimation // M.I.T. Press. 1974. 384 p.
3. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации // СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор". 2003. 370 с.
4. **Simon D.** Optimal State Estimation: Kalman H_∞ and Nonlinear Approaches // NJ: John Wiley & Sons, Inc. 2006. 552 p.
5. **Särkkä S.** Bayesian Filtering and Smoothing // Cambridge University Press. 2013.
6. **Basin M.** New Trends in Optimal Filtering and Control for Polynomial and Time-Delay Systems. // Springer. 2008. 232 p.
7. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Изд. 3-е, исправленное и дополненное. - Том. Ч. 1. Введение в теорию оценивания // СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор". 2017. 509 с.
8. **Степанов О.А., Литвиненко Ю.А., Васильев В.А., Торопов А.Б., Басин М.В.** Алгоритм полиномиальной фильтрации в задачах обработки навигационной информации при квадратичных нелинейностях в уравнениях динамики и измерений. Часть I. Описание и сопоставление с алгоритмами калмановского типа // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. №3 (114). С. 3-33.
9. **О.А. Степанов, А.С. Исаев.** Методика сравнительного анализа рекуррентных алгоритмов нелинейных фильтрации в задачах обработки навигационной информации на основе предсказательного моделирования. // Гироскопия и навигация. Том 31. №3 (122), 2023. С. 48-65. EDN: MVWKGС
10. **S. J. Julier and J. K. Uhlmann,** "A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems," in Proc. of AeroSense: The 11th Int. Symp. on Aerospace/Defence Sensing, Simulation and Controls., 1997.
11. **Lefebvre T., Bruyninckx H., De Schuller J.** Comment on "A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators" // IEEE Transactions on Automatic Control. 2002. V. 47. N. 8. P. 1406-1409.
12. **Gustafsson F., Hendeby G.** Some Relations Between Extended and Unscented Kalman Filters // Signal Processing, IEEE Transactions. 2012. V. 60. N. 2. P. 545-555. <https://doi.org/10.1109/TSP.2011.2172431>
13. **Степанов О.А., Литвиненко Ю.А., Исаев А.М.** Полиномиальный фильтр третьего порядка в задаче оценивания скалярного марковского процесса по нелинейным измерениям // Математическое моделирование, компьютерный и натуральный эксперимент в естественных науках. 2022. №4.
14. **Bar-Shalom Y., Li, X., Kirubarajan, T.** Estimation with applications to tracking and navigation, New York, Wiley-Interscience, 2001, 581 p.
15. **Li, X. R. and V.P. Jilkov** A survey of Maneuvering Target Tracking: Approximation Techniques for Nonlinear Filtering. Proc. 2004 SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets, San Diego. 2004. pp 537-535
16. **Doucet, A., Freitas, N., Gordon, N.** Sequential Monte Carlo Methods in Practice // Springer. 2001. 590 p.
17. **Исаев А.М. Богомолов В.В.** Рекуррентные итерационные алгоритмы для нелинейных задач фильтрации, использующие разложение в ряд Тейлора. Навигация и управление движением. Материалы XXV конференции молодых ученых с международным участием. Санкт-Петербург, 2023. – в печати.

O.A. Stepanov, Yu.A. Litvinenko, A.M. Isaev (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, St. Petersburg, Russia). **Comparative analysis of recursive Kalman type algorithms for polynomial filtering problems.**

Abstract. Using an earlier developed procedure, comparative analysis of recursive Kalman type algorithms used in navigation system aiding with responder beacons is performed.

В.В. БОГОМОЛОВ

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ДАЛЬНОСТЕЙ ОТ МЕНЕЕ ТРЕХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МАЯКОВ НА ОСНОВЕ РЕКУРРЕНТНЫХ МЕТОДОВ БАЙЕСОВСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Разработан рекуррентный алгоритм определения координат автономного необитаемого подводного аппарата с использованием разномоментных измерений дальностей до гидроакустических маяков, лага и курсоуказателя. Число одновременно используемых маяков может быть произвольным, но есть по крайней мере один момент, в который измерения поступают от не менее чем трех маяков. В этот момент для получения начальной точки линеаризации измерений используется приближенный аналитический способ. Во все предшествующие моменты измерения сохраняются для последующей обработки. В алгоритме используются два фильтра, параллельно обрабатывающие измерения в прямом и обратном времени. Результаты фильтра в прямом времени корректируются по результатам фильтра в обратном времени с помощью фиктивных измерений. Представлены результаты численной апробации предложенного алгоритма на продолжительном интервале времени.

Введение. Существуют разнообразные методы навигации АНПА по измерениям дальностей до гидроакустических маяков [1-8], которые отличаются количеством приемников и маяков, геометрическими особенностями их расположения, используемыми математическими подходами. В настоящей работе речь идет о так называемом методе длинной базы, предполагающем получение беззапросных измерений времени распространения сигнала от маяков с известными координатами к АНПА при синхронизированных шкалах времени маяков и АНПА. Измерение дальности формируется как произведение измеренного времени на приближенную оценку скорости звука в воде. Задача решается по серии накопленных разномоментных измерений с привлечением данных относительного лага и курсоуказателя. В основе алгоритма решения положен байесовский подход, учитывающий стохастические свойства погрешностей измерителей. Если априорные координаты АНПА отсутствуют либо их погрешности велики по сравнению с дальностью до маяков, возникают трудности с применением в рассматриваемой задаче алгоритмов калмановского типа на основе линеаризации измерений. Для получения приемлемой точки линеаризации в момент t_0 , когда впервые появляются одномоментные измерения от трех или более маяков, в настоящей работе используется приближенный аналитический способ, предполагающий отсутствие погрешностей измерений. Чтобы не потерять полезную информацию, можно учесть сохраненные до момента t_0 измерения, а затем приступить к обработке измерений, поступивших после t_0 . Такое решение, использующее процедуру сглаживания в фиксированной точке [9], было исследовано в [10, 14]. Однако обработка большого числа сохраненных до момента t_0 измерений вызывает задержку. Чтобы ее избежать, предлагается решение, в котором обработка измерений до и после момента t_0 выполняется параллельно с помощью двух фильтров в прямом и обратном времени. При этом результаты фильтра, работающего в прямом времени, корректируются по результатам фильтра, обрабатывающего сохраненные измерения.

Постановка задачи навигации АНПА. Для дискретных моментов времени $t_i, i = -N, \dots, 0, 1, 2, \dots$ имеются измерения дальности до маяков

$Y_i^j = T_i^j \hat{c}_0 = \sqrt{(x_i^j - x_i)^2 + (y_i^j - y_i)^2 + (z_i^j - z_i)^2} + \Delta c \cdot T_i^j + \delta_i + v_i^j$, где $j = 1..n_i$ – номер маяка, x_i, y_i – неизвестные горизонтальные координаты АНПА в локальной прямоугольной системе координат с географической ориентацией осей (априорная информация о них отсутствует), x_i^j, y_i^j –

известные горизонтальные координаты маяков, z_i^j, z_i – известные глубины маяков и АНПА, \bar{c} , Δc – априорная оценка скорости распространения звука в воде и ее ошибка – постоянная величина со среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma_{\Delta c}$, T_i^j – измеренное время прохождения сигнала, δ_i – общая для всех маяков и v_i^j некоррелированная для разных маяков белозумные ошибки с СКО σ_{δ} , σ_v . Предполагается, что на борту АНПА используется система счисления по измерениям продольной и поперечной составляющих скорости относительного лага с инструментальными белозумными ошибками с СКО $\sigma_{\Delta v}$ и показаниям курсоуказателя, например, магнитного компаса с ошибкой ΔK , представляющей собой стационарный марковский процесс первого порядка с СКО $\sigma_{\Delta K}$ и интервалом корреляции $\tau_{\Delta K}$. При счислении используются значения географических составляющих скорости течения с ошибками $\Delta U^x, \Delta U^y$ в виде стационарных марковских процессов первого порядка с СКО $\sigma_{\Delta U}$ и интервалом корреляции $\tau_{\Delta U}$. Все указанные ошибки считаются гауссовскими центрированными величинами. Далее под номерами i дискретных моментов времени будем понимать сами моменты t_i .

Предполагается, что для $i < 0$ имеются измерения от не более чем двух маяков, а для $i=0$ – от не менее чем трех маяков, т.е. $n_i \leq 2$ при $i < 0$, $n_0 \geq 3$. Количество используемых маяков для $i > 0$ не оговаривается.

Требуется определить горизонтальные координаты АНПА x_i, y_i для моментов $i \geq 0$ по всем доступным измерениям. Задача сводится к байесовскому оцениванию вектора состояния

$$X_i = [x_i \ y_i \ \Delta c \ \Delta K_i \ \Delta U_i^x \ \Delta U_i^y]^T \text{ по измерениям } Y_{-N}, \dots, Y_i, \text{ где } Y_i = (Y_i^1, \dots, Y_i^{n_i})^T.$$

Описание предлагаемого алгоритма. На рис. 1 приведена схема, поясняющая принцип действия предлагаемого рекуррентного алгоритма для решения сформулированной задачи. На схеме показана эволюция гауссовских аппроксимаций апостериорных плотностей $f(A|B)$ [4], т.е. плотностей вероятности оцениваемой случайной величины A , условной по отношению ко множеству измерений B . Следует иметь в виду, что сами $f(A|B)$ в алгоритме не формируются, вырабатываются лишь их параметры.

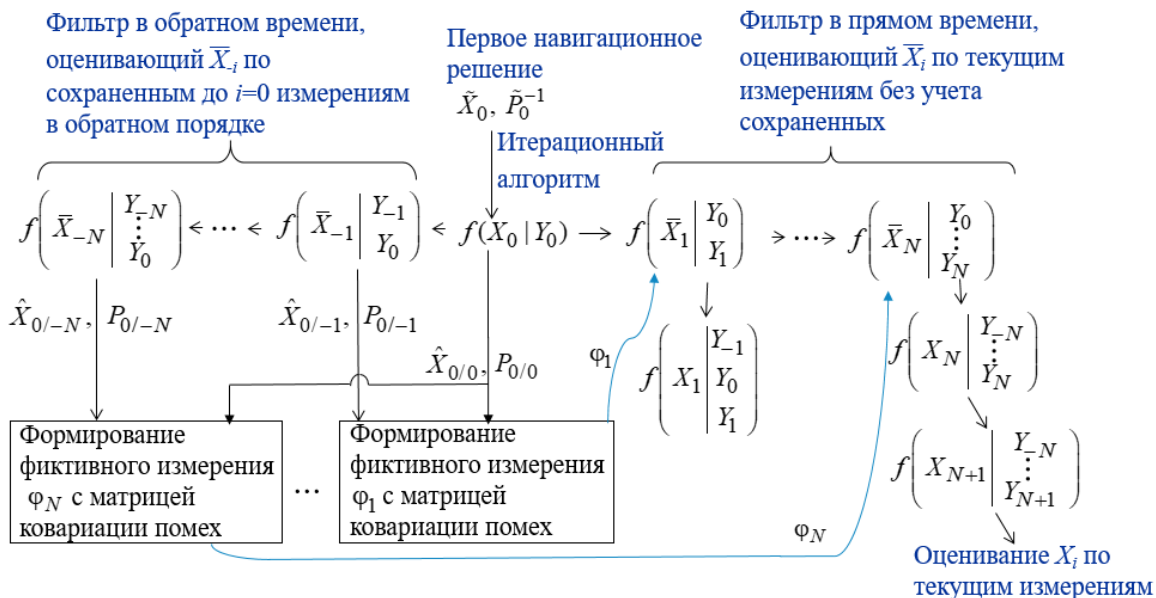


Рис. 1. Схема преобразования гауссовских аппроксимаций апостериорных плотностей при работе предложенного алгоритма. На схеме $X_{0/-i}, P_{0/-i}$ – оценка X_0 по Y_{-i}, \dots, Y_0 и ковариационная матрица ее ошибок.

Запуск алгоритма выполняется в момент $i=0$, в который по условию задачи впервые появляются измерения от трех или большего количества маяков и может быть получено первое навигационное решение. Начальная точка линеаризации \tilde{x}_0, \tilde{y}_0 определяется аналитически путем решения системы из (n_0-1) линейных уравнений, полученных из разностей дальномерных

измерений Y_0^j в предположении, что помехи измерений δ_0 , v_0^j и Δc нулевые. Формируется априорная оценка вектора состояния $\tilde{X}_0 = [\tilde{x}_0, \tilde{y}_0, 0, 0, 0, 0]^T$ и обратная ковариационная матрица ее ошибки \tilde{P}_0^{-1} в виде диагональной матрицы с диагональными элементами $0, 0, \sigma_{\Delta c}^{-2}, \sigma_{\Delta K}^{-2}, \sigma_{\Delta U}^{-2}, \sigma_{\Delta U}^{-2}$. Такая \tilde{P}_0^{-1} предполагает бесконечно большие ошибки оценок \tilde{x}_0, \tilde{y}_0 . Исходя из этих априорных данных по измерениям Y_0^j , теперь уже с учетом стохастических свойств δ_0 , v_0^j и Δc , оценивается X_0 с применением итерационного алгоритма [11]. После чего один фильтр в прямом времени (см. на схеме горизонтальные стрелки вправо) оценивает расширенный вектор состояния $\bar{X}_i = [X_0^T \ x_i \ y_i \ \Delta K_i \ \Delta U_i^x \ \Delta U_i^y]^T$ по текущим измерениям, а другой – в обратном времени (см. на схеме горизонтальные стрелки влево) оценивает расширенный вектор состояния $\bar{X}_{-i} = [X_0^T \ x_{-i} \ y_{-i} \ \Delta K_{-i} \ \Delta U_{-i}^x \ \Delta U_{-i}^y]^T$ в ходе обработки сохраненных до $i=0$ измерений. Обращаем внимание, что расширенные векторы \bar{X}_i и \bar{X}_{-i} образованы из X_0, X_i и X_0, X_{-i} с исключением дублирования Δc . По результатам работы фильтра в обратном времени формируются фиктивные измерения $\varphi_{1...N}$ с соответствующими матрицами ковариации помех.

Метод фиктивных измерений был предложен в [12] для корректировки результатов фильтра Калмана с таким расчетом, чтобы они соответствовали другим априорным данным о векторе состояния. При этом выполнять повторную обработку реальных измерений не требуется. В рассматриваемой задаче фиктивные измерения используются для быстрого преобразования результатов работы фильтра в прямом времени в результаты оценивания X_i по измерениям Y_{-i}, \dots, Y_i . Фиктивное измерение φ_1 предоставляет новую информацию о векторе X_0 , которая опирается на измерения для $i < 0$. Поскольку вектор X_0 коррелирован с текущим вектором состояния X_i , при обработке φ_1 уточняется оценка вектора X_i , полученная в прямом времени ($i \geq 0$).

Поскольку обработка измерений в прямом и обратном времени выполняется двумя независимыми фильтрами, работу этих фильтров можно реализовать с помощью технологии параллельных вычислений, что сократит время выполнения алгоритма. Вместе с обработкой текущего измерения Y_i можно обрабатывать не одно, как показано на схеме, а несколько измерений для $i < 0$. В отличие от рассмотренного в [10, 14] алгоритма, где текущие измерения Y_i для $i > 0$ обрабатываются после обработки всех Y_{-N}, \dots, Y_0 с применением процедуры сглаживания в фиксированной точке, здесь измерения для $i < 0$ учитываются постепенно, что позволяет получать уточненные оценки X_i с темпом поступления Y_i , т.е. в реальном времени.

После исчерпания всех имеющихся до момента $i=0$ измерений оценивать компоненты вектора X_i , относящиеся к моменту $i=0$, не имеет смысла, поэтому с этого момента в алгоритме оценивается только X_i по вновь поступившим измерениям.

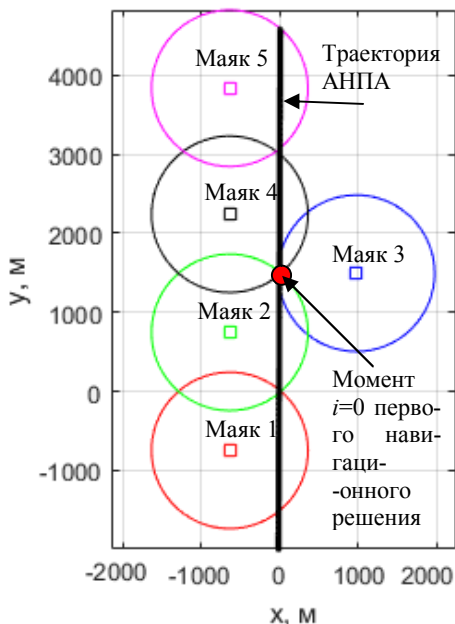


Рис. 2. Траектория движения АНПА и расположение маяков при моделировании. Окружности радиуса 1 км показывают границы доступных измерений от маяков.

После исчерпания всех имеющихся до момента $i=0$ измерений оценивать компоненты вектора X_i , относящиеся к моменту $i=0$, не имеет смысла, поэтому с этого момента в алгоритме оценивается только X_i по вновь поступившим измерениям.

Результаты моделирования. Для проверки эффективности алгоритма моделировались случайные погрешности измерений дальности, скорости и курса с СКО $\sigma_\delta = 5$ м, $\sigma_v = 10$ м, $\sigma_{\Delta c} = 3$ м/с, $\sigma_{\Delta U} = 0.1$ м/с, $\sigma_{\Delta K} = 5^\circ$, $\sigma_{\Delta U} = 0.25$ м/с и интервалами корреляции $\tau_{\Delta U} = \tau_{\Delta K} = 3600$ с. Дискретность поступления измерений 1 с. Решение проводилось при прямолинейном

движении АНПА со скоростью 5 м/с вблизи 5 маяков, расположенных как показано на рис. 2. Предельная дальность, на которой от маяков поступают измерения, принята равной 1 км.

По 1000 реализациям погрешностей моделировались три алгоритма: 1) алгоритм, обрабатывающий только измерения для $i \geq 0$ (без сохраненных измерений), 2) алгоритм с обработкой всех сохраненных измерений до обработки текущих [10, 14], 3) представленный выше алгоритм, в котором предусматривается обработка в обратном времени 10 измерений для $i < 0$ параллельно с обработкой в прямом времени одного текущего измерения. На рис. 3 для трех алгоритмов и аналитического решения приведены действительные (полученные по реализациям ошибок оценок) среднеквадратические погрешности (СКП) [13] координат вместе с номерами используемых маяков.

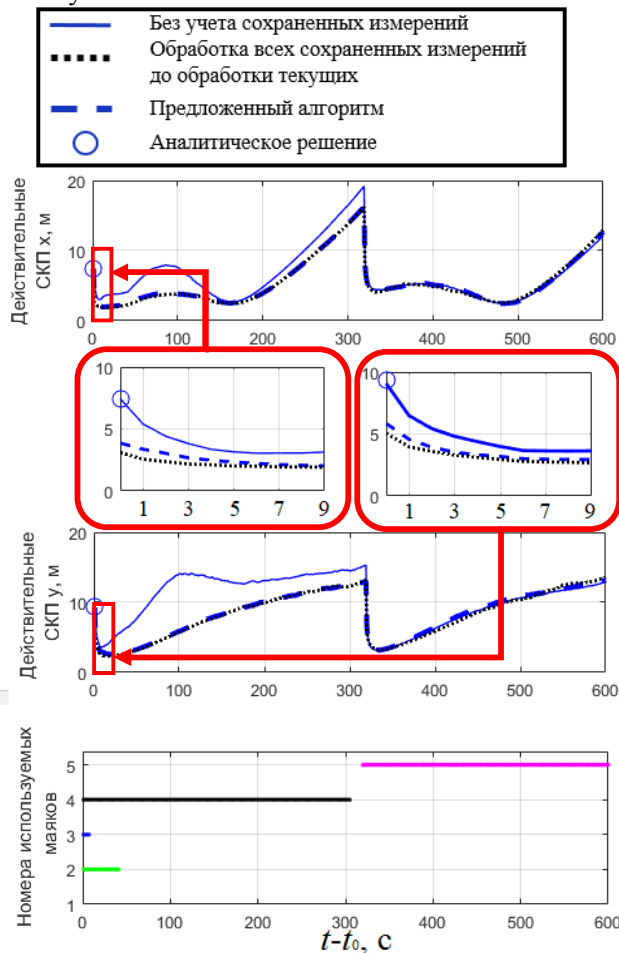


Рис. 3. Результаты моделирования алгоритмов.

линеаризации [11]. Критерий применимости аналитического решения является предметом дальнейших исследований.

Апробация предложенного алгоритма по натурным данным также подтвердила его более высокую точность по сравнению с алгоритмом без учета измерений для $i < 0$ и соответствие расчетной СКП реальным ошибкам.

Заключение. Разработан рекуррентный алгоритм решения задачи определения координат АНПА с использованием разномоментных измерений дальностей до гидроакустических маяков, относительного лага и курсоуказателя при отсутствии априорных координат АНПА. Алгоритм запускается в момент, когда на АНПА впервые одновременно получены измерения от трех или более маяков. При этом формируется аналитическое навигационное решение, не учитывающее погрешности измерений. Дальнейшая обработка измерений выполняется на основе байесовского подхода с применением линеаризации измеряемых дальностей и с учетом стохастических свойств погрешностей измерителей. Текущие измерения и измерения, полученные до запуска алгоритма, обрабатываются параллельно с помощью отдельных фильтров в прямом

Видно, что предложенный рекуррентный алгоритм, который может быть реализован с темпом поступления Y_i , не уступает по точности алгоритму, обрабатывающему сразу все сохраненные измерения. Оба этих алгоритма со сглаживанием имеют преимущество на протяжении 320 секунд перед алгоритмом, обрабатывающем только измерения для $i \geq 0$. В момент $t=320$ с, как видно из нижнего графика, начинают поступать измерения от 5-го маяка и происходит значительное уточнение координат для всех алгоритмов. Для предложенного алгоритма разность действительных и расчетных (полученные по реализациям ковариационных матриц, вырабатываемых алгоритмом) СКП находится на уровне 0,5 м. Таким образом, алгоритм вырабатывает адекватную реальным ошибкам расчетную СКП.

СКП аналитического решения в рассматриваемом случае близка к СКП стохастических решений. Это связано с благоприятной геометрией расположения маяков и АНПА в момент t_0 . При менее благоприятной геометрии расположения маяков и АНПА может использоваться сетка начальных точек

и обратном времени. Оценки фильтра в прямом времени постепенно уточняются по результатам фильтра в обратном времени. Такой алгоритм может быть реализован в реальном времени. Показано, что он практически не проигрывает в точности алгоритму, в котором сначала обрабатываются все полученные до первого навигационного решения измерения, а потом текущие измерения.

Исследование выполнено за счёт гранта РФФ 23-19-00626, <https://rscf.ru/project/23-19-00626/>

ЛИТЕРАТУРА

1. **Paul, L., Saeedi, S., Seto M., Li H.**, AUV Navigation and Localization: A Review, IEEE Journal of oceanic engineering, 2014, vol. 39, no. 1, pp. 131–149.
2. **Кебкал К.Г., Машошин А.И.** Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гирокоспия и навигация. 2016. №3. С. 115–130.
3. **Ю.В. Матвиенко, А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, А.Ф. Щербатюк.** Перспективы повышения эффективности автономных подводных роботов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2016. С. 123-141
4. **Степанов О.А.** Методы обработки навигационной измерительной информации. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 196 с.
5. **Д. А. Кошаев.** Многоальтернативный алгоритм однопаяковой навигации автономного необитаемого подводного аппарата без априорных данных о его местоположении. Часть 1. Математическое описание // Гирокоспия и навигация. 2020. Том 28. №2 (109). С. 109-130.
6. **Д. А. Кошаев.** Относительное позиционирование и определение ориентации автономного необитаемого подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков. // Гирокоспия и навигация. 2022. №4. С. 122-141.
7. **Машошин А. И., Пашкевич И. В.** Алгоритмы позиционирования автономного необитаемого подводного аппарата в процессе приведения и причаливания к подводному причальному устройству // Гирокоспия и навигация. Том 31. №1 (120), 2023. С. 103-119.
8. **Грузликов А.М., Караулов В.Г., Мухин Д.А., Шалаев Н.А.** Результаты апробации алгоритма позиционирования и определения ориентации подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. Раздел 4. Связь, навигация и наведение, 2023. С. 265-274.
9. **Медич Дж.** Статистически оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия. 1977, с. 440.
10. **Богомолов В.В.** Оценка эффективности нелинейных навигационных решений по разномоментным измерениям дальности до гидроакустических маяков. // Материалы XXIV конференции молодых ученых с международным участием. Санкт-Петербург, 2022. С. 120-123.
11. **Богомолов В.В.** Анализ эффективности нелинейных решений задачи навигации подводных аппаратов. // Материалы XXIII конференции молодых ученых с международным участием. Санкт-Петербург, 2021. С. 223-227.
12. **Д. А. Кошаев.** Метод фиктивных измерений для многоальтернативного оценивания процессов в линейной стохастической системе // Автомат. и телемех., 2016. №6. С. 81-108.
13. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. Санкт-Петербург, 2003.
14. **Богомолов В.В., Кошаев Д.А.** Алгоритм позиционирования подводного аппарата по измерениям дальности до маяков при их недостаточном для одномоментного навигационного решения количестве. // Материалы XXXIII конференции памяти выдающегося конструктора гирокоспических приборов Н.Н. Острякова. Санкт-Петербург, 2022. С. 66-69.

V.V. Bogomolov (Concern CSRI Elektropribor, ITMO University, St. Petersburg, Russia). **AUV positioning by the ranges to less than three acoustic beacons based on recursive Bayesian estimation**

Abstract. The paper presents a recursive algorithm for determining the coordinates of an autonomous underwater vehicle (auv) using time-different ranges to the acoustic beacons with log and heading indicator aiding. Any number of beacons can be used simultaneously, but at least at one moment the measurements from minimum three beacons are available. At this moment the initial linearization point is obtained using an approximate analytical method. At all the previous moments the measurements are saved for further processing. The algorithm uses two filters parallelly processing the measurements in forward and backward time. The solutions of the forward-time filter are updated by the backward-time filter data using the dummy measurements. The results of numerical testing of the algorithm on a long time interval are given.

А.М. ГРУЗЛИКОВ
(АО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

В.Г. КАРАУЛОВ, В.П. ЗОЛОТАРЕВИЧ
(Университет ИТМО, АО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ОЦЕНКА УГЛОВ ОРИЕНТАЦИИ АНПА В ЗАДАЧЕ ПРИВЕДЕНИЯ К БАЗОВОЙ СТАНЦИИ

Работа посвящена вопросу определения углов ориентации автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) относительно стационарной базовой станции с использованием высокочастотной гидроакустической системы приведения. Задача приведения предполагает маневрирование аппарата и приближение к станции для стыковки, что приводит к формированию трех зон, которые характеризуются различной акустической видимостью излучателей станции приёмными элементами аппарата. В работе приводится постановка и алгоритм решения задачи позиционирования и определения углов ориентации. Приведены оценки по допустимому крену и дифференту аппарата при его приведении. Оценки получены с использованием имитационного моделирования.

Введение. В работе рассматривается вопрос об оценке углов ориентации автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) с использованием предложенного ранее авторами алгоритма [1-2] при решении задачи приведения к стационарной базовой станции.

Решение задачи приведения не является новой, однако, в литературе преимущественно описываются методы на основе применения разнородных систем:

- на этапе сближения используются маяки – ответчики [3-4]. Однако данный подход не применим на коротких дистанциях, как по причине переотражения сигналов, так и длительным временем отклика (большая временная задержка излучения - приёма, и соответственно получения решения не обеспечивает требование по безопасности аппарата при его маневрировании на близком расстоянии от базовой станции);
- на этапе стыковки используются системы технического зрения [5-6], когда на базе устанавливаются специальные маркеры – ориентиры, а на аппарате размещаются видеокамеры. Данный подход хорошо изучен, однако, замутнение воды из-за поднятой взвеси со дна водоёма приводят к снижению точности позиционирования, или требуют создание специальных средств очистки и, соответственно, усложнению конструкции аппарата – базы.

Используемый авторами подход предполагает решение задачи позиционирования и определения углов ориентации с использованием одной гидроакустической системы (рис. 1). Система состоит из приёмных антенн, которые размещаются в носу и корме АНПА, излучателей (маяков), устанавливаемые по краям базы и осуществляющие ненаправленное излучение сигнала (в соответствии с характеристиками направленности). Излучаемые сигналы – это тональные сигналы одной частоты, излучение которых разнесено по времени таким образом, чтобы по периоду обнаружения сигнала можно было однозначно идентифицировать источник излучения.

Задача навигации предполагает маневрирование аппарата и его приближение к подводной станции, что сопряжено с формированием трёх зон с различной акустической видимостью излучателей станции приёмными элементами аппарата. Определены следующие зоны (рис. 2):

- зона 1 – в зоне видимости каждой антенны находятся все четыре излучателя;
- зона 2 – в зоне видимости каждой антенны находятся три излучателя;
- зона 3 – в зоне видимости каждой антенны находятся по одному излучателю.

Стоит отметить, что, описанный авторами алгоритм и результаты его апробации на макете аппарата – станции в испытательном бассейне [1-2,7] были получены при почти нулевых значениях крена и дифферента, что в реальной жизни не верно. Данная работа компенсирует этот недостаток, и направлена на изучение вопроса о допустимых значениях крена и дифферента АНПА, при которых ошибка определения его позиционирования и углов

ориентация не выходит за допустимые значения и достаточны для обеспечения безопасной стыковки аппарата.

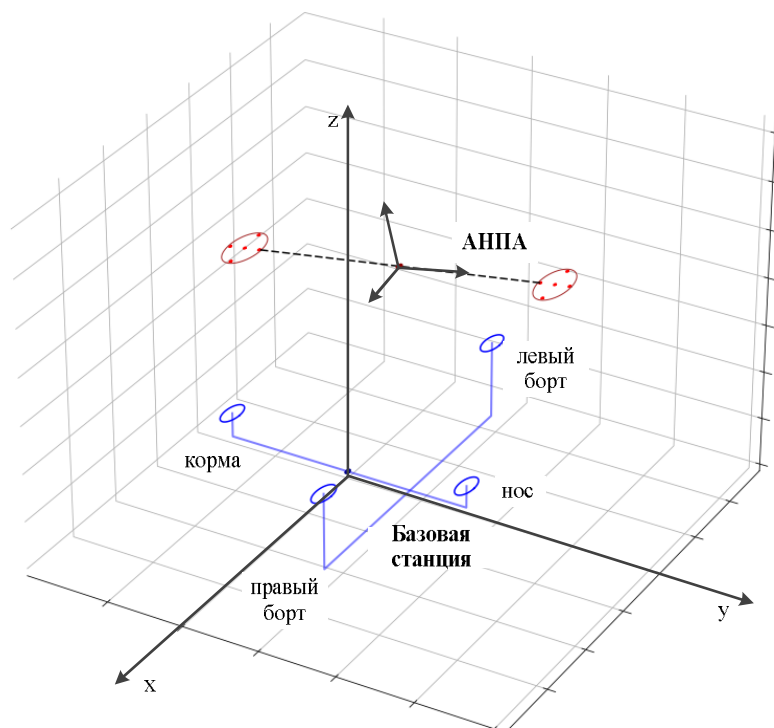


Рис. 1. Схема размещения гидроакустической системы АНПА и стационарной базовой станции

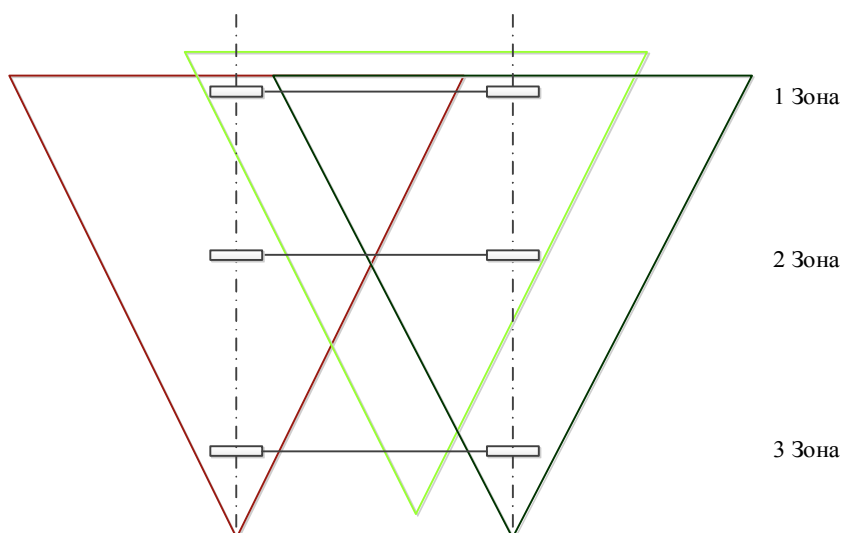


Рис. 2. Зоны гидроакустической видимости излучателей приемниками на АНПА

Постановка задачи. Требуется определить относительные координаты центра x, y, z и углы ориентации α, β, γ АНПА по измерениям времени получения фронта сигнала приёмным элементом АНПА от гидроакустических излучателей подводной станции.

Определим исходные данные [2]: пусть \hat{t}_i – оценка времени получения фронта сигнала на входе i приёмника ($i \in 1:10$), данная оценка получается путём решения задачи обнаружения известного сигнала на фоне помех от работы механизмов АНПА; пусть \hat{t}_i^j – оценка времени получения сигнала \hat{t}_i от i -го маяка ($i \in 1:10, j \in 1:4$), данная оценка получается в соответствии с известной временной диаграммы излучения (координаты маяка (x^j, y^j, z^j) и последовательность времён излучения маяков считаются известными).

Тогда расстояние от точки излучения до точки приёма для первой зоны (видимость всех излучателей) по времени распространения сигнала будет:

$$r_i^j = (\hat{t}_i^j - (t + T^{1,j}))c, \quad (1)$$

где r_i^j – расстояние, заданное по разнице времени излучения и приёма сигнала, $i = 1 \dots 10$ – индекс приёмных элементов АНПА, $j = 1 \dots 4$ – индекс излучателей, \hat{t}_i^j – оценка времени приёма сигнала, t – время излучения 1-м маяком, $T^{1,j}$ – смещение времени излучения между 1 и j маяком (соответствует временной диаграмме последовательности излучения), c – скорость звука в среде.

Исходя из положения аппарата, расстояние от точки излучения до точки приёма для первой зоны будет равно:

$$d_i^j = \sqrt{(x + \Delta x_i - x^j)^2 + (y + \Delta y_i - y^j)^2 + (z + \Delta z_i - z^j)^2}, \quad (2)$$

где d_i^j – расстояние по координатам излучателя и приёмного элемента, (x, y, z) – координаты центра АНПА, (x^j, y^j, z^j) – координаты j -го маяка, $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ – смещение i -го приёмного элемента относительно центра АНПА с учётом углов ориентации аппарата. При этом:

$$(\Delta x_i \ \Delta y_i \ \Delta z_i)^T = M_x(\alpha)M_y(\beta)M_z(\gamma)(x_i \ y_i \ z_i)^T, \quad (3)$$

где (x_i, y_i, z_i) – смещение i -го приёмного элемента относительно центра АНПА, (α, β, γ) – углы ориентации АНПА, $M_x(\alpha)$, $M_y(\beta)$, $M_z(\gamma)$ – матрицы поворота относительно осей координат [8].

Решение задачи приведения состоит в нахождении оценки $\hat{\theta} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}, \hat{t}, \hat{c})$ относительных координат и углов ориентации АНПА, а также времени излучения сигнала первым маяком и скорости звука в воде по полученным измерениям.

Оценка $\hat{\theta}_1$ в первой зоне находится путем минимизации функции:

$$\hat{\theta}_1 = \min_{\theta} \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^4 (r_i^j - d_i^j)^2 \quad (4)$$

Оценка $\hat{\theta}_2$ во второй зоне:

$$\hat{\theta}_2 = \min_{\theta} \sum_{i,j \in \{(1\dots 5,1), (1\dots 5,3\dots 4), (6\dots 10,2\dots 4)\}} (r_i^j - d_i^j)^2_{\alpha,\beta,\gamma \in \{\hat{\theta}_1\}} \quad (5)$$

Оценка $\hat{\theta}_3$ в третьей зоне:

$$\hat{\theta}_3 = \min_{\theta} \sum_{i,j \in \{(1\dots 5,1), (6\dots 10,2)\}} (r_i^j - d_i^j)^2_{\alpha,\beta,\gamma,t,c \in \{\hat{\theta}_1 \cup \hat{\theta}_2\}} \quad (6)$$

При этом, индексы i, j входящих в сумму функций определяются исходя из акустической видимости излучателей – приёмными элементами АНПА (при нахождении аппарата в первой – третьей зоне соответственно).

Алгоритм решения. Стоит отметить, что функции (4-5) являются многоэкстремальными, и применение традиционных численных методов на всей области определения координат и углов ориентации аппарата (даже с учётом естественных ограничений по дистанции распространения сигнала, по крену и дифференту подводного аппарата) является ресурсоёмкой вычислительной задачей. Как следствие, предлагается двухэтапная процедура [2]: на первом этапе – определяется окрестность области определения θ ; на втором этапе численная оценка координат и углов ориентации исходя из ограничений области определения.

На первом этапе, воспользуемся методом машинного обучения с учителем, где обучающая выборка будет формироваться исходя из геометрической модели – заданные координаты маяков базовой станции и координат приёмных элементов АНПА на заданной координатной сетке и таблице углов ориентации.

На втором этапе найдём решение с использованием метода Левенберга-Марквардта [9], где в качестве начального значения зададим координаты и углы ориентации центра окрестности, полученные на первом этапе.

Стоит обратить внимание, что главной целью второго этапа является нахождение оценки времени излучения сигнала первым маяком \tilde{t}^1 и использование данного значения для перехода к решению (5) с использованием псевдодальномерного метода [10].

Имитационное моделирование и полученные результаты. Определение допустимых значений крена и дифферента АНПА осуществлялась с использованием моделирования работы гидроакустической станции (излучение – приём) при размещении АНПА в первой зоне (случайные координаты) и при случайном значении крена (дифферента) из заданного интервала. Далее решалась задача приведения, и в случае её успешного решения интервал крена (дифферента) считался допустимым. Последовательное увеличение нижней и верхней границы интервала позволило определить допустимые границы применения предлагаемого алгоритма.

По результату моделирования установлено, что крен и дифферент АНПА должен быть не более 5° и 7° соответственно при нахождении в первой зоне и второй зоне, и не более $1-2^\circ$ в третьей зоне.

Заключение. В работе приведена постановка задачи приведения, приведён и исследован двухэтапный алгоритм определения позиционирования и углов ориентации аппарата относительно базовой станции в части оценки допустимых углов крена (дифферента). Полученные значения определяют требования к системе управления АНПА.

*Работы проводились при поддержке гранта РНФ №23-19-00626,
<https://rscf.ru/project/23-19-00626/>.*

ЛИТЕРАТУРА

1. A. M. Gruzlikov, 'Short and Ultra-Short Baseline Navigation of the AUV for Bringing It to the Bottom Docking Device', in 2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2022, pp. 1–3.
2. **Грузликов А.М., Караулов В.Г., Мухин Д.А., Шалаев Н.А.** Результаты апробации алгоритма позиционирования и определения ориентации подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 265-275.
3. **Матвиенко Ю. В.** Гидроакустический комплекс навигации подводного робота: Дис. ... канд. Тех. Наук: 01.04.06/ Матвиенко Юрий Викторович. – Владивосток. – 2004. – С. 271.
4. Wang, J., Xu, T. and Wang, Z. Adaptive robust unscented Kalman filter for AUV acoustic navigation // Sens. – 2020 – 20: 60.
5. Y. Li, Y. Jiang, J. Cao, B. Wang, and Y. Li. AUV docking experiments based on vision positioning using two cameras // Ocean Eng. – Dec. 2015. – vol. 110. – P. 163-173.
6. Zhong, L., Li, D., Lin, M., Lin, R., Yang, C. A Fast Binocular Localization Method for AUV Docking // Sensors (Basel). – 2019. – Apr., 19(7): 1735.
7. D. A. Koshayev, 'AUV Relative Position and Attitude Determination Using Acoustic Beacons', Gyroscopy and Navigation, vol. 13, no. 4, pp. 262–275, Dec. 2022.
8. **Емельянец Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2016.
9. **Измайлов А. Ф., Куренной А. С., Стецюк П. И.** Метод Левенберга-Марквардта для задачи безусловной оптимизации // Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки. Тамбов, 2019. Т. 24. № 125. С. 60-74.
10. **Прохорцов А. В., Минина О. В.** Аналитическое решение навигационной задачи на основе псевдодальномерного метода // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – Вып. 11. – С. 395 - 398

A.M. Gruzlikov, V.G. Karaulov (Concern CSRI Elektroprigor, Saint Petersburg, Russia), V. P. Zolotarevich (ITMO University, Concern CSRI Elektroprigor JSC, Saint Petersburg, Russia) **Estimation of the orientation angles of the AUV in the task of bringing to the base station**

Abstract. The work is devoted to the problem of determining the orientation angles of an autonomous uninhabited underwater vehicle (AUV) relative to a stationary base station using a high-frequency hydroacoustic guidance system. The task of bringing involves maneuvering the device and approaching the station for docking, which leads to the formation of three zones, which are characterized by different acoustic visibility of the station's emitters by the receiving elements of the device. The paper presents the formulation and algorithm for solving the problem of positioning and determining the orientation angles. Estimates are given for the permissible roll and trim of the device when it is brought. Estimates are obtained using simulation modeling.

П. А. ПЯТАВИН

(Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, Владивосток)

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТЫКОВКИ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Предложен метод автоматической стыковки необитаемых подводных аппаратов (НПА) с подводными стыковочными платформами (СП) с использованием бортовых многозвенных манипуляторов. Метод позволяет с учетом текущего взаимного расположения СП и НПА сформировать стыковочную траекторию движения корпуса аппарата и пересчитать ее в соответствующую траекторию движения схвата манипулятора.

Введение. Обслуживание глубоководных сооружений и комплексов требует использования НПА, оснащенных многозвенными манипуляторами. При этом возможность периодического обслуживания ограничена затратами на содержание судна сопровождения, а также сложной ледовой обстановкой. Появление НПА нового поколения [1], способных базироваться на СП, где осуществляется зарядка аккумуляторных батарей аппарата, а также передача информации, собранной им в процессе выполнения операций, позволит обеспечивать круглогодичное обследование технических сооружений и трубопроводов без использования судов сопровождения. На сегодняшний день процедура стыковки НПА со СП производится с помощью специальных «ловушек» [2] или посадочных гаков [3]. Известные подходы, основанные на применении «ловушек», затруднительны в реализации для крупных НПА, имеющих сложную форму или оснащенных манипуляторами [4]. Кроме того, автоматическая стыковка НПА со СП – это сложная задача, требующая решения проблем, связанных с обнаружением СП и точным позиционированием НПА [5, 6].

Поэтому предлагаемый доклад посвящен разработке нового метода автоматической стыковки НПА с подводной док-станцией с использованием бортового многозвенного манипулятора с универсальным схватом.

Формирование траектории движения схвата манипулятора. Перед стыковкой необходимо определить расположение СП с помощью бортовых систем технического зрения [7]. С помощью системы [8] СП идентифицируется на основе облаков точек, полученных от многолучевых сонаров или стереокамер, установленных на НПА. Затем НПА перемещается в зону стыковки таким образом, чтобы занять пространственное положение и ориентацию, при которых схват манипулятора сможет схватиться за специальный захват на корпусе СП.

Для точного позиционирования и перемещения НПА должен иметь достаточно развитый движительно-рулевой комплекс, обеспечивающий возможность управления перемещениями аппарата по шести степеням свободы. Установленный на НПА манипулятор в свою очередь должен обладать шестью степенями подвижности для осуществления захвата и притягивания НПА с требуемой пространственной ориентацией к СП.

Для осуществления процедуры стыковки траектория движения НПА формируется таким образом, чтобы удовлетворять требованиям безопасности процедуры сближения и гарантировать успешность стыковки. В момент захвата схватом манипулятора штанги СП, они становятся кинематически связанными. Для управления перемещением корпуса НПА в данном случае необходимо задать такую траекторию движения схвата манипулятора с соответствующим изменением его ориентации, чтобы в результате отработки указанной траектории манипулятор переместил НПА в нужную позицию.

Пусть стыковочная траектория движения НПА задана в виде набора n точек $P_i (i = \overline{1, n})$ в связанной с аппаратом СК $C_0 X_{C_0} Y_{C_0} Z_{C_0}$, тогда выражение для пересчета в траекторию бортового манипулятора $P'_i (i = \overline{1, n})$ без учета ориентации схвата будет иметь вид:

Научный руководитель: заместитель директора по научной работе к.т.н. Коноплин А.Ю.

$$\vec{P}'_i = \vec{P}'_{C_i} = \vec{P}'_0 - \vec{P}'_i, \quad (1)$$

где P'_0 – начальное положение схвата манипулятора; P'_{C_i} – положение схвата манипулятора в СК аппарата, перемещенного в точку P_i .

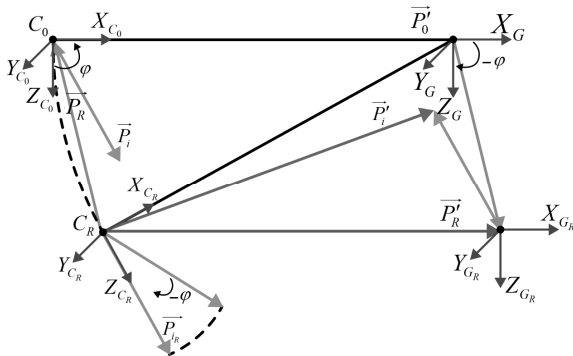


Рис. 1. Схема пересчета траектории движения и ориентации схвата манипулятора в проекции на Cxz .

На рис. 1 приведена схема пересчета траектории схвата манипулятора с учетом его ориентации. Пусть M_R – матрица поворота, соответствующая желаемому изменению ориентации корпуса НПА вокруг его собственных осей во время движения по траектории. Тогда вектор ориентации схвата манипулятора будет рассчитываться как:

$$\vec{d}' = M_R^T \vec{d} \quad (2)$$

где \vec{d}' и \vec{d} – желаемый и текущий векторы ориентации схвата соответственно.

А выражение для пересчета траектории схвата

с учетом (1) примет вид:

$$\begin{aligned} \vec{P}'_i &= \vec{P}'_R - \vec{P}'_{i_R} = \vec{P}'_R - M_R^T \vec{P}'_i, \\ \vec{P}'_R &= -\vec{P}'_R = M_R^T \vec{P}'_0 - \vec{P}'_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где \vec{P}'_R – вектор компенсации сдвига корпуса НПА, связанного с изменением ориентации схвата; \vec{P}'_{i_R} – вектор движения в точку траектории с учетом поворота; \vec{P}'_R – вектор смещения корпуса НПА, связанного с изменением ориентации схвата.

Таким образом были получены выражения, позволяющие формировать траекторию движения манипулятора с учетом ориентации его схвата, обеспечивающую перемещение корпуса НПА по стыковочной траектории.

Моделирование движения НПА при помощи манипулятора. Для исследования предложенного метода с помощью численного моделирования в Matlab/Simulink использовалась апробированная модель НПА с манипулятором [9,10]. Проводилась процедура стыковки НПА со СП, расположенной под углом в 10° к горизонту. В процессе стыковки НПА успешно перемещался по заданной траектории и коснулся СП в заданной точке. Также была выполнена оценка возникающих во время стыковки внешних моментов в приводах манипулятора, а также сил и моментов, возникающих в точке крепления схвата манипулятора к штанге СП. Было обнаружено, что на больших скоростях движения НПА, а также при значительных углах наклона корпуса НПА к горизонту неизбежны проворачивания схвата манипулятора относительно захваченной штанги СП. Эти проворачивания необходимо компенсировать, поскольку они негативно сказываются на точности выполняемой стыковки.

Заключение. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного метода и возможность его использования для стыковки НПА с помощью бортового манипулятора. Запланированные исследования по данному направлению будут сосредоточены на разработке системы согласованного управления приводами бортового манипулятора и двигателями НПА для компенсации возникающих в процессе стыковки сил и моментов в точке крепления схвата манипулятора к штанге СП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038, <https://rscf.ru/project/23-71-10038/>

ЛИТЕРАТУРА

1. Kiselev L.V., Kostenko V.V, Medvedev A.V., Specific features of a hybrid underwater vehicle motion dynamic model // Underwater Investigation and Robotics. 2021. No. 1(35). P. 18–30.
2. A.M. Yazdani, K. Sammut, O.A. Yakimenko et al., A survey of underwater docking guidance systems // Robotics and Autonomous Systems (2019).
3. T. Fukasawa, T. Noguchi, T. Kawasaki and M. Baino, "MARINE BIRD", a new experimental AUV with underwater docking and recharging system // Oceans 2003, Teaming Toward the Future, 2003, pp. 2195-2200 Vol.4.
4. N. Palomeras et al., I-AUV docking and intervention in a subsea panel // 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014, pp. 2279-2285.
5. K. Teo, E. An and P. -P. J. Beaujean, A Robust Fuzzy Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Docking Approach for Unknown Current Disturbances // IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 37, no. 2, pp. 143-155, April 2012.
6. Page B.R., Lambert R., Chavez Galaviz J. and Mahmoudian N. Underwater Docking Approach and Homing to Enable Persistent Operation // Front. Robot. AI 8:621755.
7. **Konoplin A.Yu.**, Yurmanov A.P., Krasavin N.A., **Piatavin P.A.**, Panchuk M.O., Vasilenko R.P. System for Identifying Target Objects to Perform Manipulative Operations by Unmanned Underwater Vehicles // IEEE International Conference on Ocean Studies. 2022. P. 55–59.
8. **Konoplin A.**, Yurmanov A., Krasavin N., **Piatavin P.** Development of a Control System for Multilink Manipulators on Unmanned Underwater Vehicles Dynamically Positioned Over Seafloor Objects // Applied Sciences. 2022; 12(3):1666.
9. **Konoplin A.**, Krasavin N. Automatic Speed Control System for Manipulator Mounted on Underwater Vehicle. 2022 IEEE International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2022. P. 205–209.
10. Filaretov V. F., **Konoplin A.Yu.**, Zuev A.V., Krasavin N.A. A method to synthesize high-precision motion control systems for underwater manipulator // International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM). 2021. Vol. 20. №. 4. P. 625–636.

P.A. Piatavin (Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok). **Automatic docking method of an autonomous underwater vehicle utilizing an on-board manipulator.**

Abstract. The method of automatic autonomous underwater vehicle docking with special stations utilizing an onboard multi-link manipulator is proposed. The method allows building autonomous underwater vehicle docking trajectory, taking into account relative position of special station. Then recalculating docking trajectory into an on-board manipulators working tool trajectory.

В. А. ОСЕЛЕДЕЦ (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ В ЗАРАНЕЕ НЕИЗВЕСТНОЙ ОБСТАНОВКЕ

В докладе представлен метод формирования траекторий группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) при обходе препятствий. АНПА двигаются в режиме «лидер – ведомые» в заданном строю в неизвестной обстановке. АНПА-ведомые двигаются за лидером, в соответствии с заданным им местом в строю. Эффективность предложенной метода подтверждена результатами математического моделирования.

Введение. В настоящее время необходимость использования автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) возрастает ввиду их возможности выполнять широкий спектр задач, связанных с обзорно-поисковыми и геологоразведочными работами, океанографическими исследованиями и работами военного назначения [1]. При этом одним из основных способов повышения эффективности выполняемых миссий считается использование групп АНПА.

При реализации стратегий группового управления возникает проблема согласования движения роботов группы. Одним из подходов обеспечения безопасного движения роботов является использование специального расписания, при котором не допускается столкновение роботов [2]. В работе [3] описаны методы управления группой роботов на основе алгоритмов, которые предназначаются для роя роботов. Также, управление группой роботов в неизвестной обстановке рассматривается в работе [4], где столкновения с препятствиями предотвращаются путем изменения типа заданного строя или скорости движения группы роботов, чтобы эта группа обходила препятствие на безопасном расстоянии.

В рассмотренных примерах реализация согласования траекторий роботов группы происходит за счет постоянного обмена между собой информацией, содержащей данные о текущем положении друг друга. Однако такой подход является малоприменимым для АНПА, ввиду больших задержек при передаче данных по гидроакустическим каналам и их низкой пропускной способности.

Предлагаемый доклад посвящен способу управления группой АНПА в неизвестной обстановке с использованием визуальной информации при отсутствии каналов связи между членами группы.

Постановка задачи и решение. В работе рассматривается группа АНПА, состоящая из АНПА-лидера, АНПА-ведомых и АНПА-ведомых-ведомыми. АНПА-лидер имеет всю информацию о выполняемой миссии и формирует свою траекторию движения так, чтобы обеспечить выполнение этой миссии. На борту АНПА-лидера установлены несколько световых маяков, которые могут наблюдать АНПА-ведомые через свои бортовые видеокамеры и на основе этой видеoinформации формируют данные о положении и ориентации АНПА-лидера относительно ведомого. Используя эту информацию, АНПА-ведомые движутся за лидером и поддерживают свое место в строю. На АНПА-ведомых также установлены световые маяки, а АНПА-ведомые-ведомыми оснащены бортовыми видеокамерами. Таким образом, в строю ведомые являются лидерами для прочих АНПА-ведомых.

АНПА-ведомые не имеют информации о своем текущем местоположении в абсолютной системе координат. Желаемое положение АНПА-ведомого в строю задается в системе координат (СК), связанной с АНПА-лидером, что позволяет сформировать желаемый строй

Научный руководитель научное звание, ведущий научный сотрудник, Юхимец Дмитрий Александрович.

группы АНПА независимо от их положения и ориентации в абсолютной СК в процессе выполнения миссии.

Для определения положения АНПА-ведомых относительно АНПА-лидера получаемое с бортовой видеокамеры изображение обрабатывается таким образом, чтобы на картинке отображались только маяки лидера, пиксельные координаты (геометрические центры масс каждого из элементов) которых определяются. Далее по известным параметрам бортовой видеокамеры и пиксельным координатам происходит расчет положения АНПА-ведомого, которое необходимо для определения целевой точки.

Во время движения АНПА в подводной среде подразумевается его перемещение в априорно неизвестной обстановке, в которой могут иметься препятствующие движению участники группы объекты. АНПА группы должны обходить эти препятствия на безопасной дистанции, исключая при этом возможности столкновения с другими участниками группы. Таким образом, при вычислении целевой точки появляется необходимость учитывать показания с бортовых дальномеров. Для этого применяется специальный алгоритм формирования траекторий, корректирующий желаемое положение АНПА-ведомых при обнаружении препятствий, используя при этом показания с бортовых дальномеров [5].

Для обеспечения возможности высокоточного движения АНПА по сложным пространственным траекториям используется система управления (СУ) с прогнозирующими моделями АНПА, обеспечивающая высокую точность управления движением. Задавая желаемое положение АНПА-ведомого, система управления движением формирует такие тяги и моменты силы, которые обеспечивают прибытие АНПА-ведомого в заданную точку с желаемой ориентацией

Исследование эффективности метода. Для проверки эффективности метода было проведено математическое моделирование движения группы подводных аппаратов, состоящей из пяти роботов (1 лидер, 2 ведомых, 2 ведомых-ведомыми), двигающихся в треугольном строю. Каждый АНПА-ведомый оснащен видеокамерой, имеет на борту 4 дальномер, расположенных в передней части АНПА. На корме АНПА-лидера и АНПА-ведомых установлены по 4 маяка. Моделирование проводилось в среде CoppeliaSim. АНПА-лидер движется по прямой, проходя через узкий проход между двумя препятствиями, а АНПА-ведомые, не имея возможности пройти препятствия с сохранением строя, смещаются за траекторию лидера. Результаты моделирования подтверждают работоспособность системы.

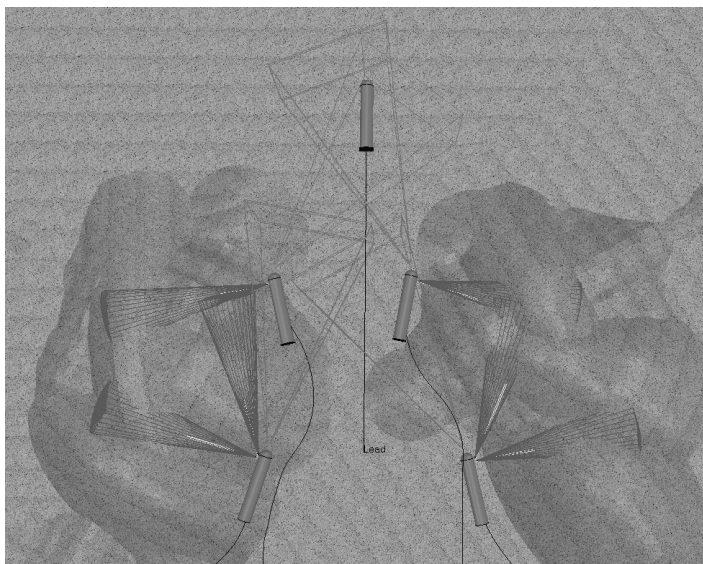


Рис. 1. Движение группы АНПА в неизвестной обстановке

Заключение. В докладе представлен метод реализации движения группы АНПА в режиме «лидер-ведомые» в обстановке, содержащей заранее неизвестные препятствия. Особенностью предложенного метода является обеспечение безопасного перемещения этих АНПА в условиях, когда между АНПА группы отсутствует передача данных по акустическим каналам связи для согласования траекторий их движения. Это достигается за счет использования информации от бортовых видеокамер АНПА-ведомых для определения положения и ориентации АНПА-лидера относительно этих ведомых, а также за счет предварительного задания

траекторий перемещения каждого АНПА-ведомого внутри строя. При этом особенностью предложенного метода является задание такого смещения ведомых внутри строя, которое исключает потерю маяков АНПА-лидера области видимости камер ведомых.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ляхов, Д.Г.** Современные задачи подводной робототехники / Д.Г. Ляхов // Подводные исследования и робототехника. - 2012. - №13. - С. 15-24.
2. **Spensieri D., Carlson J. S., Ekstedt F., Bohlin R.** An Iterative Approach for Collision Free Routing and Sheduling in Multirobot Stations, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 950 – 962.
3. **Yong L., Yu L., Yipei G., Kejie C.** Cooperative path planning of robot swarm based on ACO, *Proc of the IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronics and Automation Control Conference (ITNEC)*, Chegdu, 2017, pp. 1428 – 1432.
4. **Зенкевич С.Л., Галустян Н.К.** Децентрализованное управление группой квадрокоптеров, *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2016, т. 17, № 11, с. 774 — 782.
5. **Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А.** Разработка метода формирования траекторий движения группы подводных аппаратов в среде с препятствиями во время их обхода, *Мехатроника, автоматизация, управление*, №6, 2020, с. 356 — 364.

V.A.Oseledets (Far East Federal University, Vladivostok)

Development of a control system for a group of autonomous unmanned underwater vehicles in an unknown environment.

The paper presents a method for generating trajectories for a group of autonomous uninhabited underwater vehicles (AUVs) while avoiding obstacles. AUVs move in the “leader-follower” mode in a given formation in an unknown environment. Followers AUVs move behind the leader, in accordance with their assigned place in the formation. The effectiveness of the proposed method is confirmed by the results of mathematical modeling.

А. П. ЮРМАНОВ, М. О. ПАНЧУК

(Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, Владивосток)

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ ИНТЕРВЕНЦИОННЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ, ОСНАЩЕННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМ КАНАЛОМ СВЯЗИ

В докладе предложен подход к созданию систем поддержки деятельности операторов интервенционных автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), обеспечивающих эффективное выполнение манипуляционных операций с заранее известными объектами в супервизорном режиме с использованием гидроакустического канала связи.

Введение. Различные типы необитаемых подводных аппаратов имеют большое значение для исследования и освоения Мирового океана. АНПА выполняют осмотр и поиск, обследуют протяженные участки морского дна. Они функционируют самостоятельно на больших глубинах, не требуют специализированных судов и большого количества персонала для обслуживания, а также могут преодолевать значительные расстояния в поиске целевых объектов.

Оснащение АНПА подводными манипуляторами (ПМ) позволило бы значительно расширить сферу их применения и сделало бы возможным выполнять широкий спектр задач от забора грунта с определенных участков морского дна, до очистки и обслуживания сложных подводных конструкций [1,2]. Однако автоматическое выполнение манипуляционных операций с помощью АНПА без участия человека во многих случаях затруднено из-за сложностей в идентификации и определении местоположения объектов в водной среде. Зачастую эти объекты могут быть заиленными, покрытыми обрастаниями или иметь повреждения. Вдобавок существуют операции, которые необходимо выполнять под контролем эксперта с непрерывным формированием указаний [3, 4]. Для информационного обмена АНПА с оператором необходимо использование высокоскоростных гидроакустических каналов передачи данных. К сожалению, из-за физических особенностей водной среды таких каналов просто нет и, вероятно, не будет в ближайшем будущем.

В настоящее время уже разработаны методы и системы, позволяющие оценить сложность рельефа морского дна в зоне работ [5,6], определить форму и местоположение объекта работ относительно АНПА [7], сформировать траекторию движения рабочего инструмента по их поверхности [8], а также передать видеоизображения посредством акустической связи с АНПА [9]. Известные разработки хоть и облегчают операторам восприятие окружающей подводной обстановки и упрощают процесс ручного управления ПМ, но не позволяют эффективно выполнять манипуляционные операции АНПА под контролем оператора в условиях изменяющейся пропускной способности гидроакустической системой связи.

Для решения вышеуказанной проблемы в докладе представлена система поддержки деятельности операторов интервенционных АНПА, обеспечивающая эффективное выполнение манипуляционных операций в диалоговом супервизорном режиме с использованием гидроакустического канала связи.

Система поддержки деятельности операторов интервенционных АНПА. Предлагаемая система синтезирована на основе разработанных авторским коллективом методов [7,8], а также нового подхода к супервизорному управлению АНПА и его ПМ на основе целеуказаний оператора, переданным по гидроакустическому каналу связи в диалоговом режиме. Выполнение манипуляционной операции с заранее известным объектом работ выполняется в несколько этапов. Первоначально выполняется идентификация объекта на основе данных, получаемых от бортовых сонаров, с последующим сближением АНПА с объектом и стабилизацией аппарата в режиме зависания [10,11]. Затем положение и форма объекта уточняются с учетом его возмож-

Научный руководитель: заместитель директора по научной работе к.т.н. Коноплин А.Ю.

ного заиливания и обрастания с помощью облаков точек, поступающих от бортовых систем технического зрения (СТЗ). Для проверки достоверности идентификации сравниваются две проекции одной проверочной траектории: проекция на поверхность отсканированного объекта с проекцией этой же траектории на триангуляционную поверхность совмещенной модели объекта [7].

Ввиду того, что автоматическая идентификация объекта по облакам точек, полученным от СТЗ, не гарантирует правильное определение заранее известного объекта, необходимо, чтобы оператор смог самостоятельно оценить результаты идентификации. Для оправки на пост оператора система, учитывая текущую скорость гидроакустического канала связи, адаптивно формирует набор информации, состоящей из оценки точности совмещения, набора точек проверочных траекторий, а также сжатого фотоизображения объекта работ. Например, если канал связи имеет низкую скорость передачи данных (60-100 байт/с), система изначально отправит информацию о пространственном положении объекта и минимальные набор проверочных траекторий (не менее 20 точек). Оператор может запросить и дополнительную информацию (иную проверочную траекторию или фотоизображение). Вся принятая на посту оператора информация отображается на специальном графическом интерфейсе (рис. 1), где визуально отображается АНПА, а также на основе переданных от аппарата данных воссоздается сцена рабочей зоны, включающей объект работ.

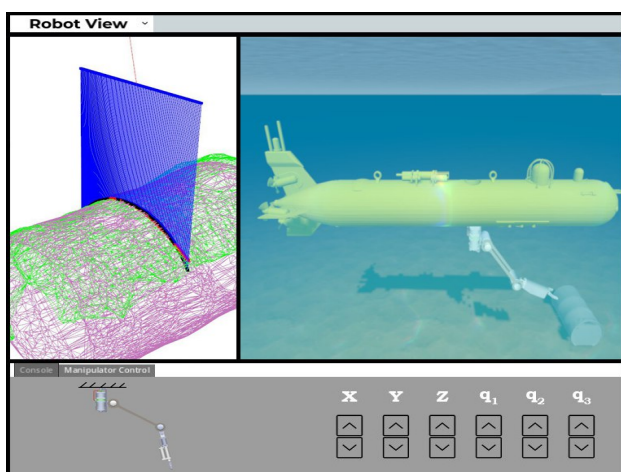


Рис. 1. Интерфейс поддержки деятельности оператора АНПА

После подтверждения оператором правильности идентификации система рассчитывает необходимые для выполнения манипуляционной операции положение и ориентацию АНПА, а также строит желаемую траекторию движения рабочего инструмента ПМ [8]. Для уточнения этой траектории используется специальный графический маркер, закрепленный на ПМ, положение которого идентифицируется СТЗ и сравнивается с положением, рассчитанным с помощью решения прямой задачи кинематики для этого ПМ. Таким образом в реальном масштабе времени вычисляется обусловленный неточностью калибровки СТЗ вектор ошибки, который позволяет перенести желаемую траекторию

движения ПМ на поверхность целевого объекта. Уточненная траектория обрабатывается ПМ в автоматическом режиме. При этом оператор имеет возможность контролировать каждый этап выполнения манипуляционной операции, начиная с идентификации объекта работ, и давать команды АНПА для перехода от одного этапа к другому.

Предложенная система была исследована с помощью численного моделирования в программных пакетах CoppeliaSim и Matlab/Simulink с использованием динамической модели АНПА с ПМ [7]. Кроме того, проводились натурные эксперименты в условиях экспедиций, а также бассейновые испытания с разработанными ПМ и СТЗ. Результаты исследований свидетельствуют о работоспособности и высокой эффективности системы.

Заключение. Разработанная система поддержки деятельности операторов интервенционных АНПА позволяет значительно увеличить скорость и качество выполнения манипуляционных работ за счет автоматизации процесса выполнения операций при одновременном снижении умственной нагрузки на операторов АНПА.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038, <https://rscf.ru/project/23-71-10038/>

ЛИТЕРАТУРА

1. Carrera A., Ahmadzadeh S.R., Ajoudani A., Kormushev P., Carreras M., Caldwell D.G. Towards Autonomous Robotic Valve Turning. *Cybern. Inf. Technol.* 2012. № 12. P. 17–26.
2. Galloway K.C., Becker K.P., Phillips B., Kirby J., Licht S., Tchernov D., Wood R.J., Gruber D.F. Soft Robotic Grippers for Biological Sampling on Deep Reefs. *Soft Robot.* 2016. № 3. P. 23–33.
3. Djapic V., Nađ Đ., Ferri G., Omerdic E., Dooly G., Toal D., Vukić Z. Novel method for underwater navigation aiding using a companion underwater robot as a guiding platforms. *2013 MTS/IEEE OCEANS-Bergen.* 2013. P. 1–10.
4. Sivčev S., Omerdić E., Dooly G., Coleman J., Toal, D. Towards inspection of marine energy devices using ROVs: Floating wind turbine motion replication. *ROBOT 2017: Third Iberian Robotics Conference.* 2018. Vol. 1.P. 196–211.
5. Dukan F., Sørensen A.J., Sea floor geometry approximation and altitude control of ROVs. *Control Engineering Practice.* 2014. № 29. P. 135–146.
6. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота. *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2017. № 8. С. 543–549.
7. **Коноплин А.Ю., Юрманов А.П., Красавин Н.А., Пятавин П.А.** Разработка, программная реализация и исследование системы управления многозвенными манипуляторами необитаемых подводных аппаратов при динамическом позиционировании над морскими объектами. *Подводные исследования и робототехника.* 2021. № 3 (37). С. 4–15.
8. **Коноплин А. Ю., Юрманов А. П.** Система поддержки деятельности операторов манипуляторов, установленных на подводных аппаратах. *Подводные исследования и робототехника.* 2021. № 2 (36). С. 18-27.
9. Tolstonogov A. Y., Shiryayev A. D. The Image Semantic Compression Method for Underwater Robotic Applications. *OCEANS 2021: San Diego–Porto.* 2021. P. 1–9.
10. **Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю.** Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 1. *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2014. № 6. С. 53–56.
11. **Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю.** Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 2. *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2014. № 7. С. 29–34

A.P. Yurmanov, M.O. Panchuk (Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok). **Support system for the activities of operators of interventional underwater vehicles equipped with a hydroacoustic communication channel.**

Abstract. The report proposes an approach to the creation of systems to support the activities of operators of interventional autonomous uninhabited underwater vehicles (AUV), ensuring the effective performance of manipulation operations with previously known objects in a supervisory mode using a hydroacoustic communication channel.

Research on path planning algorithm based on D* search

Jiajun Leng

Laboratory of Science and Technology
on Marine Navigation and Control,
China State Shipbuilding Corporation,
Beijing 100036, China
Tianjin Navigation Instruments
Research Institute, Tianjin 300131,
China
jackan@buaa.edu.cn

Abstract—Path planning algorithms are current research hotspots and play an important role in the field of production and life. However, with the increasing complexity of dynamic requirements in real path planning problems, traditional path planning algorithms have exposed their limitations. Heuristic algorithms that can solve dynamic environment problems are gradually becoming the mainstream research direction. The D* algorithm, as one of the new heuristic algorithms, has the advantages of being more computationally efficient than the A* algorithm and being able to solve dynamic problems, and has played an important role in two-dimensional path planning projects such as the NASA Mars rover. But its theoretical research and practical application in 3D environment are very rare. In this context, this paper carries out an in-depth study of the path planning problem based on the D* algorithm, realizes the path planning process of the algorithm in 2D environment with the help of simulation program, and completes the theoretical derivation and simulation process in 3D environment. In this paper, in order to fit the complex two-dimensional environment, a complex random two-dimensional map is established by random generation, and the simulation of D* algorithm is realized on the map with the help of Python language, which realizes the finding of the relative optimal path. Then, in order to study the feasibility of D* solving in 3D environment, the theoretical derivation of 3D D* is completed by referring to the theoretical study of 3D A*, and the simulation of D* algorithm under 3D map is realized with the help of Python and Unity3d. The research results show that the simulation results are good, which is valuable for the theoretical research and practical application of heuristic algorithms, and plays a role in the application of robot path planning algorithms, and also provides a new theoretical support for the research of three-dimensional D*.

Keywords—Path Planning, Heuristic Algorithms, Complex Stochastic Environments, Python Simulation Implementation, D* Algorithm

I. INTRODUCTION

Path planning refers to the process of finding an optimal route from the environment from the starting point to the goal point according to specific constraints in a complex external environment. According to the general statement in the academic world, all planning problems that can be topologized as point and line networks are related to path planning algorithms, and also basically all of them can be solved by using path planning methods[1]. This wide range of problem solving makes path planning algorithms get the attention and concern of many researchers. The process of solving problems by path planning algorithms can be broadly explained as follows: parameter acquisition of the environment and collecting enough information about the environment for mathematical modeling. After that, the path

should be searched and an optimal solution should be found by the algorithm. Depending on the algorithm and the requirements, the paths obtained are naturally much different. So when solving this problem, an absolute optimal solution is often not obtained, but a relative optimal solution. According to the different requirements of time, distance, movement mode, etc., the path comparison is carried out in the actual problem to get the most suitable answer. Finally, it is optimized according to the algorithm.

A variety of efficient path planning algorithms have been researched in related academic circles. Among them, heuristic path planning algorithms are the most dominant category of path planning algorithms that have emerged in the last three decades. Heuristic algorithms are algorithms that find relatively optimal solutions within acceptable computational costs, but do not necessarily obtain all feasible and absolutely optimal solutions. The D* algorithm, represented by D* lite, absorbs the strengths of various previous heuristic planning algorithms and combines the computational processes of these algorithms so that the D* algorithm is always maximized in dynamic and static composite environments.

In the article the authors implement the D* algorithm for path planning in both 2D and 3D environments, and finally apply the research results to path planning in complex environments for robots. The theoretical derivation of three-dimensional environment is more difficult, the method used in this paper is to refer to the principle of A* algorithm, with the help of the "Rubik's Cube" model to deal with complex three-dimensional problems. At the same time, simulation experiments are carried out with the help of Python, MATLAB and Unity3d to verify the effectiveness of the algorithm.

II. IMPLEMENTATION OF THE D* ALGORITHM IN 2D AND 3D ENVIRONMENTS

A. Two-dimensional path planning

Map modeling and algorithm implementation are equally important tasks. In the map modeling part, in order to implement the D* algorithm completely and close to the dynamic environment conditions, this thesis adopts a complex way such as random generation to build a large 2D map. In the algorithm realization part, combined with the previous content, it is known that the generality and the number of practical applications of D* lite are larger than other kinds of D* algorithms, and its related information is more. Therefore, in this part, D* lite is used as the object for program editing and simulation. Considering the necessity of visualizing the results of large-scale planning, data export and visualization are carried out in this section.

In the formal implementation of the D* algorithm, taking into account the practical needs, the algorithm that can only complete the path planning in small maps has no practical application value. Mature D* algorithms must work well in large dynamic maps in order to be considered as accomplishing the path planning task. In this paper, we use a randomized distribution-based algorithm to generate large maps with sufficient complexity on our own.

The principle is roughly as follows: first set the map size and boundaries, the start and end points, and the total number of obstacles to appear. Next, the key parameter of complexity is set, which determines the degree of dispersion of the obstacles when the map is randomly generated. After that, the "1" in the 2D binary map, i.e. the obstacles, are randomly distributed among the blanks of the set area by generating random numbers, and the rest of the blanks are recognized as the space where the experimental target can be reached. This process is always constrained by the parameter of complexity. The specific formulas are listed below:

$$shape = ((height//2) * 2 + 1, (width//2) * 2 + 1) \quad (1)$$

First define height, width, and shape as the set of lengths and widths. Due to the specificity of the algorithm, the map width and height must be odd [2], to prevent the subsequent recursive process of random selection from being affected.

$$complexity = int (complexity * (5(shape [0] + shape [1]))) \quad (2)$$

Here is the definition of complexity, complexity needs to be based on the size of the map to carry out the appropriate proportion of the conversion. int is to point to the downward rounding of the calculation rules, shape[0] and shape[1] refers to the length and width of the map, respectively.

After that, the boundary is built to shape a map that is surrounded to prevent the map from planning a situation where there is no way to go or no need to plan. Finally, random assignment is performed to generate randomness with the help of a function based on rnd statements to distribute obstacles into the map.

For the experimental target, since the map is randomly generated, resulting in a great possibility of outdated environmental information, there will be no chance of retaining valid environmental information when repeating the experiment. And the fact that the new map is almost completely unknown to the moving target simulates an extreme situation that produces a dynamic process of almost complete change in the environment. In more requirements-oriented terms, the original map is "destroyed" in the dynamic process. This is the most difficult situation to solve in the actual needs of a situation, the solution to this situation, basically can cope with all the dynamic changes in the situation.

D* algorithm of the key to rhs and g*(s) use. s refers to the node, the cost function rhs is used to record the successor node of the raster node g(s), that is, Equation (3):

$$hs(s) = \begin{cases} 0, & \text{if } s = s_{start} \\ \min_{s \in Succ(s)} (c(s', s) + g(s')), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

And g*(s) is the predecessor node of the raster node, i.e.:

$$g^*(s) = \begin{cases} 0, & \text{if } s = s_{start} \\ \min_{s \in pred(s)} (c(s', s) + g^*(s')), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

In the above formulas, succ refers to the successor form, which corresponds to the successor node g(s), and pred refers to the predecessor form, which corresponds to the predecessor node g*(s). c refers to the overhead function, s refers to the surrogate node, s' refers to the next node, s_start refers specifically to the current node, and rhs refers to the cost function.

When dealing with unknown environments, D* lite avoids excessive attempts at paths that cannot be passed by using a reverse search algorithm.

B. Three-dimensional path planning

The implementation of 3D D* algorithms is a similar process to 2D. Map modeling and algorithm implementation are still important in this part. At the same time, the difficulty of modeling and implementation has increased due to the increase in dimensionality. The theoretical derivation of D* lite in three dimensions has not yet been available in public sources to draw on, and its derivation and programming are also more difficult. So this part draws on the 3D A* algorithm to complete.

Three-dimensional space environment simulation digital map construction is a more complex process [3]. Compared with the two-dimensional "maze" type of random obstacle distribution, three-dimensional space cannot be directly applied to this map generation rules. Random two-dimensional obstacles are projected as a large number of floating obstacles in three dimensions, which are difficult to be encountered in real scenarios, and the related simulation results do not have enough reference significance for real projects. In the actual project, the scene similar to the undulating mountain terrain is closer to reality, for example, the outer space environment where the planetary rover is located, the terrain is not two-dimensional, but there is no need to consider the floating obstacles. As for motion objects in the form of drones, the actual flight still has to stay close to the undulating terrain of mountain ranges to avoid high altitude turbulence and signal impacts. Therefore, the construction of undulating terrain is the focus of large-scale 3D map work.

Manual drawing is to model the map directly and complete the map generation according to different needs. In Unity3d, the handling of 3D objects is very efficient. With the help of some of the features of Unity3d, it is possible to draw a suitable 3D map by using brush painting.

The implementation of D* lite in three dimensions is similar to two dimensions, but there are many differences. There is no direct reference for the 3D D* algorithm, and there is no corresponding algorithmic transformation for 3D in Anthony Stentz's paper (D* Algorithm Proposer) [4]. After referring to the algorithmic treatment of 3D A*, the following conclusions can be known and deduced [5]:

The directions around the nodes are changed. The 8 directions are different in 2D and 26 directions are deduced for 3D. This partly draws on the idea of a three-dimensional A*.

Similar to a Rubik's Cube, the center square of a Rubik's Cube is surrounded by 26 different squares, and during the gridding process, the center square can be moved to any of these 26 squares, each of which can be used as the next node to the current node. So during the movement process, the corresponding cost spends of the 26 squares have to be calculated each time. The specific effect is similar to Figure 1.



Figure 1 Structure of a third-order Rubik's Cube

A key difference between D* lite and A*, as seen in the context of the algorithm, is that D* lite uses 'key' as a comparison parameter. 'key' is a key parameter that affects the cost function rhs. In two dimensions, the keys of different nodes do not produce a leveling effect like the cost function f in the A* algorithm. The keys of different nodes generally cannot be equalized. However, in three dimensions, due to the involvement of a third direction, the key is bound to produce unreasonable results if only data from the first two directions are computed. Ignoring the data in one direction may lead to the conclusion that the results of route selection in multiple directions are all consistent. Therefore, it is necessary to change the computational equation of the 26 nodes to a three-dimensional form in this part, i.e., s becomes s', so that the result of key's leveling can be avoided.

The rules for calculating nodes such as successor nodes and predecessor nodes remain unchanged. According to the previous two-dimensional content, it can be seen that the calculation of the predecessor nodes and successor nodes calculation rules and dimensionality has nothing to do with the core idea is to calculate the parameter values corresponding to different nodes, that is, to quantize the node information of different positions. And such a process only needs to add the computational part of the new axes to the computational equation when the dimension is increased. For the node search rule and sorting method, it is fixed. The specific formula changes as formula (5) and (6).

$$rhs(s) = \begin{cases} 0, & \text{if } s = s_{start} \\ \min_{s \in Succ'(s)} (c(s', s) + g(s')), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$g^*(s) = \begin{cases} 0, & \text{if } s = s_{start} \\ \min_{s \in pred'(s)} (c(s', s) + g^*(s')), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

In the calculation, the predecessor pred and successor succ of node s become pred' and succ', which just means that

another dimension of data needs to be added to the calculation, but the idea of traversal is the same as the idea of sorting, so the traversal part remains unchanged in the actual program, and what needs to be changed is the pred and succ of the Calculation of the dimension. The specific process and two-dimensional and three-dimensional space between two points is similar to the distance calculation.

The idea used in practical obstacle judgment is slope judgment. That is, terrain with a large slope is an impassable obstacle, and terrain with a small slope is a passable space. This is also in line with the movement characteristics of the actual robot. When implemented into the program, it needs to be processed with the help of a slope map.

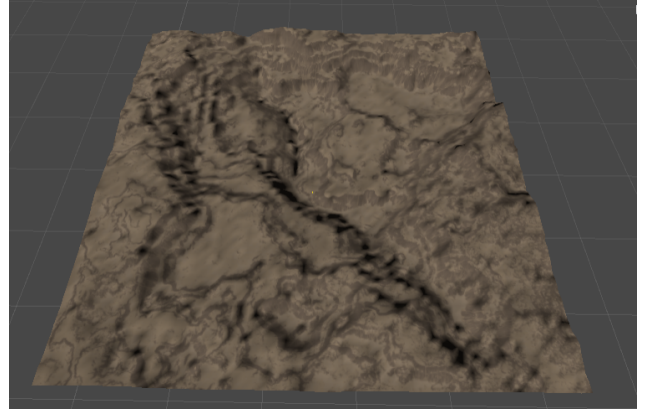


Figure 2 Unity3d large three-dimensional map overall effect diagram

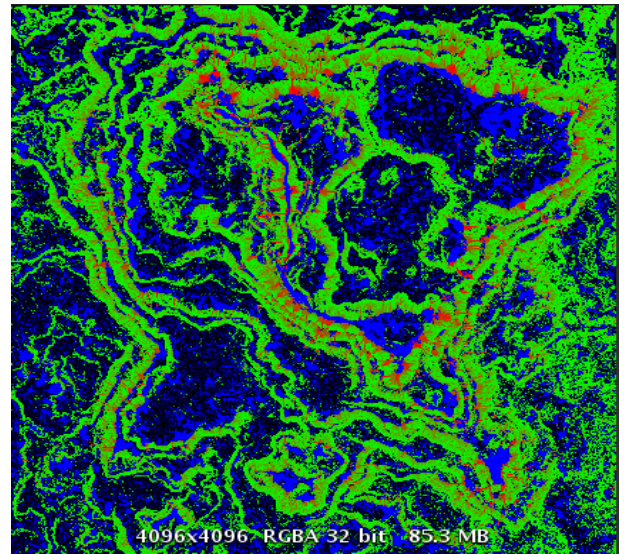


Figure 3 Unity3d map slope map

In this map, the characteristics are similar to the regular slope map, and different colors can be used to indicate different degrees of undulation. And the color that is too green can be judged as an obstacle. This process can also be dynamically adjusted by setting a threshold of green color to control the demarcation between high and low slopes.

III. SIMULATION RESULT

A. Two-dimensional path planning

Figure 4 shows the large 2D random map and D*lite planning path generated by MATLAB, it can be seen that firstly, the map is complex enough that it is basically impossible to get the planning path without algorithmic computation. Secondly, the whole path planning process is

successful and there are no cases of going through walls, dead loops, or having a suitable path but not being able to find it out. At the same time, in localized areas, such as the details in the figure, the D* lite algorithm demonstrates its heuristic property, i.e., the strategy of "trying" different paths. When walking into a closed obstacle region, D* lite computes the result that no path can be planned in the current region, and then it returns to the previous suitable region and "tries" again in another direction.

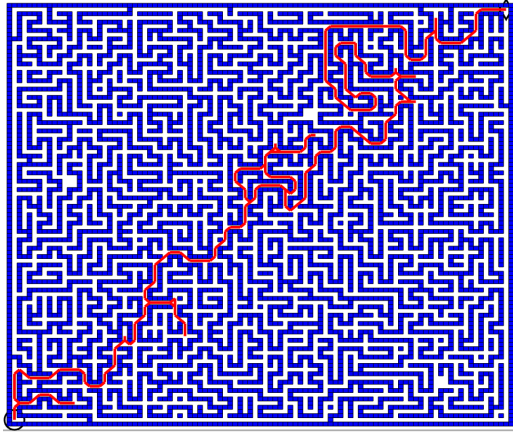


Figure 4 Structure of a third-order Rubik's Cube

The D* lite algorithm completes the entire path planning process after this "trying" process from start to finish. Although there may be more suitable routes, such as the green route, in areas like the one in Figure 5, this does not affect D* lite's ability to find relatively optimal solutions. Also in Figure 5, since there is more than one passable route from the start to the end, if the upward direction is chosen at the very beginning, there is no possibility of obtaining the absolute optimal route in green as long as there is a passable path in the upward direction. This also shows that as long as the D* lite algorithm has a "trying" process, there is no guarantee that the absolute optimal path will be obtained. The only way to get the green optimal path is to compare all the optimal paths, or to choose the direction to the right at the beginning, which is also a kind of random factor. The high efficiency of D* lite and the absolute shortest distance of the path cannot co-exist.

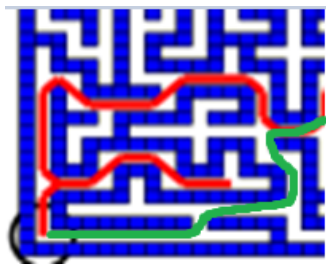


Figure 5 Comparison plot of local optimal solutions for planning results

In addition, after many changes to the map parameters, D* lite was still able to complete the path planning process, which proves the reliability of this part of the algorithm and program. Figure 6 shows the 2D D* lite planning process for changing the map.

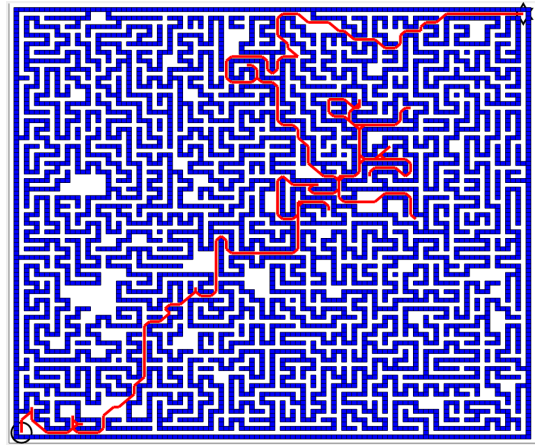


Figure 6 Map of route planning results after changing the map

B. Three-dimensional path planning

In Unity3d's terrain, the principle of judging obstacles adopts the more generalized slope principle [6], i.e., terrain with too large a slope is an impassable area, and too small a determination is a passable space. As shown in Figure 7, which is a localized map after the 45° determination, it can be clearly seen that the white areas with smaller slopes are passable areas, and the red areas with larger slopes are impassable areas.

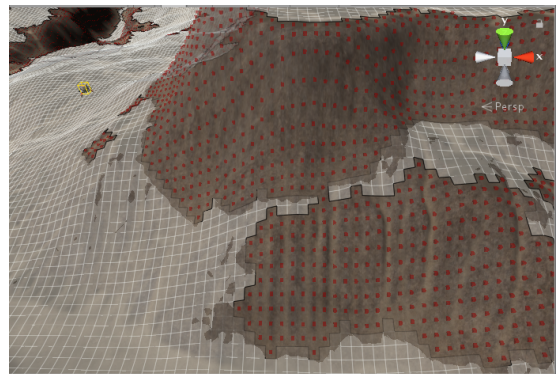


Figure 7 Localized view of 45° obstacle determination

The operation of the route is calculated using D* lite, which can be done to draw a green trajectory in real time. The specific effect is shown in Fig. 8 and Fig. 9.

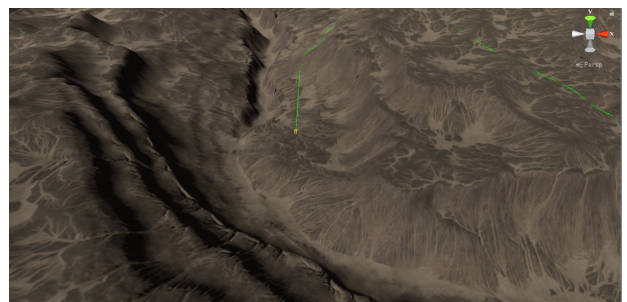


Figure 8 Roadmap without judgmental obstacle perspective

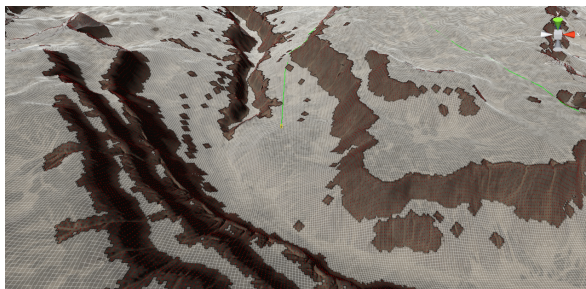


Figure 9 Roadmap with the judgment of the obstacle perspective

In the figure, it can be clearly seen that when the controlled robot (the yellow point in the figure) is going to move to the high ground on the right, since there are sloping areas, i.e., obstacles, between the current position and the high ground, the robot under the control of the algorithm picks the way to go around the obstacles and completes the path planning. And the green route is in line with such a search strategy.

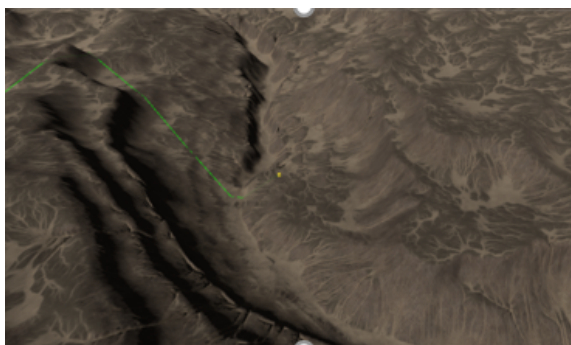


Figure 10 Picture of path planning results for repeated trials

Fig. 10 The result graph after repeated experiments, it can be clearly seen that the robot has followed the path planning strategy and selected the relatively optimal path in green under different terrains, without crossing obstacles or getting stuck in place. The reliability of the algorithm and program is further verified.

IV. CONCLUSION

In this paper, through the research work on the path planning algorithm based on the D* algorithm, the design and implementation of the D* lite algorithm on a large two-dimensional map is completed. The theoretical derivation of D* lite in three-dimensional space was completed, and the design and implementation of D* lite algorithm was completed in Python language environment and Unity3d.

These works make the research on D* algorithm more in-depth. The effectiveness of D* is also verified, and its efficiency is also analyzed and compared, and its obvious advantages under dynamic problems are summarized. The related research also facilitates the implementation and practical application work of the algorithm and increases the feasible use scenarios of the algorithm. The study of maps in 2D and 3D conditions helps to analyze the feasibility of the simulation of practical application scenarios. The theoretical analysis and program implementation under two-dimensional and three-dimensional conditions provide help, implementation and simulation verification for the solution of path planning problems, and provide theoretical basis and simulation results to prove the solution of problems under three-dimensional conditions.

REFERENCES

- [1] Zhang Guanglin, Hu Xiaomei, Chai Jianfei, Zhao Lei, Yu Tao. A review of path planning algorithms and their applications[J]. Modern Machinery,2011(05):85-90.
- [2] Li Yamei,Su Long. A raster map stitching method based on local features[J]. Computer Application and Software,2020,37(1):110-115.
- [3] Chen Chunmei. Research on fast three-dimensional trajectory planning algorithm for unmanned aircraft[D]. Sichuan:University of Electronic Science and Technology,2015.
- [4] Anthony Stentz.OPTIMAL AND EFFICIENT PATH PLANNING FOR UNKNOWN AND DYNAMIC ENVIRONMENTS[J].International Journal of Robotics & Automation,1995 ,10(3):89-100.
- [5] SHI Junwei,BAO Shitai,FENG Yu. Mountain optimal path analysis based on A* algorithm*[J]. Modern Computer(Popularization Edition),2013,(5):9-11,15.
- [6] ZHAO Dequn,DUAN Jianying,CHEN Pengyu, et al. Optimal path planning for 3D maps based on A* algorithm[J]. Computer System Applications,2017,26(7):146-152. DOI:10.15888/j.cnki.csa.005859.

УДК 681.78

О. А. СТЕПАНОВ, Ю. А. ЛИТВИНЕНКО, А. М. ИСАЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПОЛЯМ ДЛЯ ИНВАРИАНТНОЙ И НЕИНВАРИАНТНОЙ СХЕМ ОБРАБОТКИ

Проанализированы особенности задачи навигации по геофизическим полям с точечным зондированием информации, решаемой с использованием инвариантной и неинвариантной схем обработки. Предложена приближенная процедура, позволяющая проанализировать влияние ошибок каждого из источников информации на точность различных вариантов решения задачи. Описан пример, использованный для иллюстрации предложенной методики.

Введение. Известно, что задача навигации по геофизическим полям (ГФП) может быть эффективно решена с использованием алгоритмов, основанных на байесовской теории фильтрации и обеспечивающих нахождение оптимальных в среднеквадратическом смысле оценок и соответствующих им матриц ковариаций [1-10]. Среди задач навигации по ГФП принято выделять задачи с точечным зондированием поля, в которых используются датчики поля, вырабатывающие скалярные измерения [1-4]. Специфической особенностью таких задач помимо ее нелинейности является протяженный во времени характер. Ранее в [11, 12] было показано, что точность определения координат места в значительной степени зависит от характера погрешностей навигационной системы (НС) во время проведения обсервации: при их изменчивости - точность определения координат значительно ухудшается. Для снижения этой зависимости предложено привлекать информацию о характере траектории во время проведения коррекции [13]. Однако учет модели движения в целом усложняет постановку исследуемой задачи нелинейной фильтрации в силу увеличения размерностей как самого вектора оцениваемых параметров, так и вектора измерений. В то же время при проведении предварительного исследования точности, в том числе с целью выбора того или иного варианта решения задачи, целесообразно выполнять предсказательное моделирование. Такое моделирование требует значительного объема вычислений, поскольку для нелинейных задач не существует универсального (простого в вычислительном плане) алгоритма, аналогичного фильтру Калмана (ФК) и обеспечивающего оптимальное их решение в общем случае. В этой связи целесообразно на этапе предварительного исследования располагать упрощенной процедурой приближенного анализа точности. В докладе описывается одна из возможных упрощенных процедур предварительного анализа точности решения задачи навигации по ГФП с точечным зондированием, позволяющая, в том числе, учесть данные о траектории движения объекта.

Постановки задач фильтрации при точечном зондировании информации данных о ГФП и особенности вариантов их решения. Предположим, что на борту объекта имеется опорная НС, вырабатывающая измерения координат $y^{HC}(t) = [y^{HC(1)}(t) \ y^{HC(2)}(t)]^T$ в моменты времени t , и датчик, обеспечивающий скалярные измерения геофизического поля $y^{ГФП}$, показания которых могут быть представлены в виде

$$y^{HC}(t) = X(t) + \Delta y^{HC}(t), \quad (1)$$

$$y^{ГФП}(t) = \phi(X(t)) + \Delta y^{ГФП}(t), \quad (2)$$

где $X(t) = [X_1(t) \ X_2(t)]^T$ – истинные координаты подвижного объекта, описывающие его траекторию в некоторой прямоугольной системе координат на плоскости; $\Delta y^{HC}(t) = [\Delta y^{(1)}(t) \ \Delta y^{(2)}(t)]^T$ – погрешности выработки координат места НС; $\phi(X(t))$ – функция векторного аргумента, определяющая карту поля и позволяющая с точностью до ее

погрешностей $\Delta y^k(t)$ вычислять значения поля в произвольной точке заданного района; $\Delta y^{\Gamma\Phi\Pi}(t) = \Delta y^{\Delta}(t) + \Delta y^k(t)$ – суммарная погрешность датчика $\Delta y^{\Delta}(t)$ и карты поля. Задача заключается в уточнении показаний НС.

Опираясь на результаты работ [11-14], можно сформулировать следующие, представленные в таблице 1, варианты постановок задач фильтрации, направленные на уточнение показаний НС и учитывающие наличие измерений (1) и (2), включая априорную информацию о траектории движения объекта. В таблице 1 введены векторы $(x^{HC}(t))^T$, $(x^{\Gamma\Phi\Pi}(t))^T$, $(x^{OB}(t))^T$, используемые для описания погрешностей НС, суммарной погрешности карты и датчика поля и траектории движения объекта в виде формирующих фильтров, задаваемых с помощью линейных дифференциальных уравнений и соответствующих матриц наблюдения. Например, траектория $X(t)$ может быть представлена с помощью формирующего фильтра $\dot{x}^{OB}(t) = Fx^{OB}(t) + Gw(t)$, $X(t) = H^{OB}x(t)$, в котором, F , G – известные матрицы необходимой размерности, а $w(t)$ – порождающий шум единичной интенсивности. Значение координат в начальный момент времени $X(t_0) = H^{OB}x(t_0)$ определяет начальное расположение траектории на плоскости. Далее для сокращения записи аргумент времени t опущен.

Т а б л и ц а 1

Варианты постановок задач фильтрации.

Вариант	Используемая информация при решении задачи фильтрации	Вектор состояния	Измерения
Неинвариантная постановка задачи, учитывающая наличие информации о траектории движения объекта			
1	-Траектория, -Измеритель поля, -НС.	$x = \left[(x^{OB})^T \quad (x^{\Gamma\Phi\Pi})^T \quad (x^{HC})^T \right]^T$	$y^{HC} = X + \Delta y^{HC}$ $y^{\Gamma\Phi\Pi} = \phi(X) + \Delta y^{\Gamma\Phi\Pi}$
2	-Траектория, -Измеритель поля, -НС используется только в момент начала решения задачи фильтрации.	$x = \left[(x^{OB})^T \quad (x^{\Gamma\Phi\Pi})^T \right]^T$	$y^{\Gamma\Phi\Pi} = \phi(X) + \Delta y^{\Gamma\Phi\Pi}$
3	-Траектория, -НС.	$x = \left[(x^{OB})^T \quad (x^{HC})^T \right]^T$	$y^{HC} = X + \Delta y^{HC}$
Инвариантная постановка задачи, не предполагающая привлечение информации о траектории движения объекта; измерения НС используются как входные сигналы			
4	-Измеритель поля, -НС.	$x_i = \left[(x^{\Gamma\Phi\Pi})^T \quad (x^{HC})^T \right]^T$	$y^{\Gamma\Phi\Pi} = \phi(y^{HC} - \Delta y^{HC}) + \Delta y^{\Gamma\Phi\Pi}$

Проанализируем особенности представленных в таблице постановок задач фильтрации.

Эти варианты разбиты на две группы. В первых трех вариантах постановка задачи формулируется в соответствии с неинвариантной схемой обработки (или неинвариантным подходом), предполагающей наличие и использование информации о траектории движения объекта во время обсервации.

В варианте 1 в полной мере используется вся имеющаяся информация: о характере движения объекта, передаваемая свойствами процесса X ; свойствами ошибок измерений НС Δy^{HC} – (1); свойствами суммарных ошибок карты и измерителя $\Delta y^{\Gamma\Phi\Pi}$ в измерениях (2). Таким образом, при решении соответствующей задачи фильтрации удастся в полной мере учесть временные и (или) частотные свойства процессов, описывающих X , $\Delta y^{\Gamma\Phi\Pi}$ и Δy^{HC} . Эффективность использования измерений НС (1) определяется различием свойств процессов, описывающих траекторию X и ошибок НС Δy^{HC} , а измерений поля (2) – различием свойств X и ошибок $\Delta y^{\Gamma\Phi\Pi}$.

В варианте 2 измерения НС не используются при решении задачи фильтрации, однако, данные от НС привлекаются в начальный момент времени для построения области априорной неопределенности, а при завершении интервала поступления данных о ГФП, полученные в результате решения задачи фильтрации оценки X , используются для коррекции показаний НС. В этом случае задача определения координат X может быть в принципе решена, но при таком

варианте не учитываются возможности оценивания изменчивой составляющей Δy^{HC} , обусловленные различием свойств процессов, описывающих траекторию и ошибки НС. Если эти различия не существенны, то и потери в точности оценивания координат, по сравнению с вариантом (1), будут незначительными, т.к. привлечение информации об X на фоне ошибок НС будет малоэффективным. В противном случае потери в точности могут быть ощутимыми.

В варианте 3, измерения поля не используются и здесь отсутствует возможность оценивания координат в начальный момент времени $X(t_0)$, однако можно оценить приращения $\delta X(t) = X(t) - X(t_0)$ и изменчивую составляющую ошибки НС $\delta y^{HC}(t) = \Delta y^{HC}(t) - \Delta y^{HC}(t_0)$, за счет возможного различия их временных свойств.

Последний 4-й вариант соответствует так называемой инвариантной схеме обработки (инвариантному подходу) и постановке задачи фильтрации, при которой информация о траектории не привлекается. При использовании такого подхода, согласно принципу распределения информации [1], данные от навигационной системы используются не как измерения в задаче фильтрации, а трактуются как известные входные сигналы. Однако, свойства погрешностей НС Δy^{HC} и суммарных погрешностей карты и измерителя $\Delta y^{ГФП}$ в задаче фильтрации учитываются. Из сказанного следует, что такая постановка позволяет учесть отличия свойств Δy^{HC} и $\Delta y^{ГФП}$, поскольку они входят в уравнения для измерений в задаче фильтрации. Вместе с тем, в силу отсутствия измерения (1) не используются резервы, связанные с учетом различия свойств X и Δy^{HC} . Если изменчивость погрешностей НС существенная и различия временных свойств траектории и погрешностей НС значимы, то отказ от (1) может привести к ощутимому снижению точности, достигаемой для варианта 4, по сравнению с вариантом 1. Все рассмотренные выше варианты задач фильтрации, за исключением варианта 3, являются нелинейными.

Приведенные рассуждения позволяют лишь на качественном уровне предсказать возможное соотношение результатов решения задач оценивания, соответствующих различным вариантам. Более подробный анализ точности решения задачи и исследование ее зависимости от свойств процессов, описывающих траекторию и погрешности используемых измерительных средств, предполагает выполнение значительного объема предсказательного моделирования, что в силу нелинейного характера задачи требуют проведения вычислений. По этой причине и предлагается описываемая в следующем разделе приближенная процедура, позволяющая, не только более предметно на качественном уровне проанализировать влияние каждого из источников информации на эффективность решения задачи, но и оценить этот вклад количественно.

Приближенная процедура предварительного анализа точности. Суть предлагаемой процедуры заключается в исключении нелинейного характера задачи и сведения исходной задачи к ее линейному аналогу, что позволяет при анализе точности использовать отработанные легко реализуемые алгоритмы линейной фильтрации и при этом в полной мере учесть статистические свойства случайных процессов, описывающих свойства траектории, ошибок измерителей полей и ошибок НС. Поясним идею на простейшем одномерном примере, полагая, что измерения и координаты – скалярные процессы, а поле описывается линейной функцией $\phi(\cdot)$ и при этом коэффициент, определяющий наклон равен h , т.е. $\phi(\cdot) = hX$. В этом случае вместо (1) и (2) будем иметь два однотипных измерения, которые можно записать как

$$y^{HC} = X + \Delta y^{HC}, \quad (3)$$

$$y^{ГФП} = \phi(X) + \Delta y^{ГФП} = hX + \Delta y^{ГФП}. \quad (4)$$

Такое представление позволяет исключить нелинейность задачи и создает предпосылки для лучшего понимания причин отличия в точности при решении задачи в различных вариантах. В частности, проиллюстрируем сказанное на примере анализа особенностей инвариантного подхода (вариант 4). С этой целью преобразуем измерения (1) и (2) с помощью линейного преобразования к виду

$$\begin{bmatrix} \Delta y \\ y^{HC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y^{ГФП} \\ y^{HC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y^{ГФП} - h\Delta y^{HC} \\ x + \Delta y^{HC} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Заметим, что в силу невырожденности этого преобразования, набор измерений (5) с точки зрения точности эквивалентен исходному набору измерений. Поскольку в инвариантном подходе вместо векторного измерения (5) используется только разностное измерение $\Delta y = \Delta y^{ГФП} - h\Delta y^{HC}$, не зависящее от координат объекта, это и является причиной возможного снижения точности. Иными словами, потери в точности здесь связаны с заменой векторного измерения (5) на скалярное измерение $-\Delta y$.

Исключение нелинейного характера задачи позволяет существенно упростить ее решение, которое для различных постановок сводится к использованию ФК, настроенного на соответствующую модели для оцениваемых процессов и ошибок используемых средств измерения.

Описание примера. В докладе предложенная приближенная процедура проиллюстрирована путем моделирования на примере. В качестве опорной рассматривались навигационные системы двух типов - инерциальная система и система счисления пути по данным курса и скорости [15], временные свойства погрешностей которых на интересующем нас интервале времени заметно отличаются. Для проведения моделирования конкретизированы составы векторов $x^{OB}(t)$, $x^{HC}(t)$, $x^{ГФП}(t)$ и соответствующих им формирующих фильтров и с их использованием сформулированы и решены 4 описанных в таблице (1) варианта задач фильтрации. При этом для реализации приближенной процедуры нелинейные уравнения сведены к линейным в предположении, что при решении задачи навигации по данным ГФП используется два поля (поле ускорения силы тяжести и поле рельефа дна), каждое из которых представляет собой наклонную плоскость, с разными направлениями градиентов, под углом 90 градусов друг относительно друга. Соотношение для коэффициентов $h_{\Delta\varphi}$, $h_{\Delta w}$, определяющих наклон плоскостей полей, и значений σ_{Σ}^2 и σ_{η}^2 , определяющих уровень погрешностей суммарных ошибок соответствующих карт измерителей, задавались одинаковыми, при этом для удобства предполагалось, что по одному полю можно уточнить широту, а по другому - отшестствие. Количественные результаты, полученные, при моделировании в описанном примере, подтвердили приведенные выше выводы о соотношении точностей, достигаемых при решении задачи в различных вариантах.

Очевидно, что при использовании реальных датчиков полей и конкретных НС цифры будут меняться в широких пределах, но отмеченные выше тенденции в той или иной степени должны проявляться и тем самым способствовать пониманию получаемых результатов. В частности, эти соображения подтверждаются сопоставлением результатов, полученных с использованием описанной приближенной методики, с результатами, полученными ранее в [13] для реального полигона с использованием разработанных алгоритмов, учитывающих нелинейный характер задачи.

Заключение. Проанализированы особенности задач нелинейной фильтрации, решаемых с использованием байесовского подхода при коррекции навигационных систем по данным о геофизических полях с точечным зондированием поля с использованием инвариантной и неинвариантной схем обработки.

Предложена приближенная, легко реализуемая процедура, позволяющая, с одной стороны, более предметно на качественном уровне анализировать влияние каждого из источников информации на эффективность решения задачи коррекции, а с другой - оценивать этот вклад количественно.

Описан рассматриваемый в докладе пример, иллюстрирующий применение предложенной приближенной методики.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00626,
<https://rscf.ru/project/23-19-00626/>.*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П.** Теория корреляционно-экстремальных систем. М.: Наука 1979г.
2. **Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П.** Основы навигации по геофизическим полям. - М.: Наука. 1985. 328 с.
3. **Степанов О.А.** Методы оценки потенциальной точности в корреляционно-экстремальных навигационных системах Аналитический обзор / Санкт-Петербург, 1993.
4. **Белоглазов И. Н., Казарин С. Н. и Косьянчук В. В.** Обработка информации в иконических системах навигации, наведения и дистанционного зондирования местности. ФИЗМАТЛИТ, 2012.
5. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / Под. общей редакцией В.Г. Пешехонова, редактор О.А. Степанов. – Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. – 390 р.
6. **Melo J. and Matos A.** Survey on advances on terrain based navigation for autonomous underwater vehicles//Ocean Engineering, vol. 139, p. 250-264, Jul. 2017, doi: 10/gbkwpd.
7. **Sanciani, A.; Raquet, J.** Airborne Magnetic Anomaly Navigation. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2017, 53, 67–80.
8. **Pasnani P. and Seto M. L.** Terrain-Based Localization and Mapping for Autonomous Underwater Vehicles using Particle Filters with Marine Gravity Anomalies IFAC-PapersOnLine, vol. 51, no. 29, p. 354-359, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.09.498.
9. **Джанджгава Г.И.** Навигация по геополям / Г.И. Джанджгава, Л.И. Августов. – М: Научтехлитиздат, 2018. – 296 с.
10. **Bo H. Liu, L. Wu, L. Bao, Q. Li, P. Zhang, M. Xi, and Y. Wang** Comprehensive features of matching algorithm for gravity aided navigation, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 2022, no. 19, pp. 1–5.
11. **Степанов О.А., Васильев В.А., Торопов А.Б.** Решение задачи навигации по геофизическим полям с учетом изменчивости погрешностей корректируемой навигационной системы в сборнике: XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. сборник материалов. Санкт-Петербург, 2022. С. 60-65
12. **Васильев В.А., Степанов О.А.** Анализ эффективности решения задачи навигации с использованием карты и измерителя геофизического поля в зависимости от изменчивости погрешностей корректируемой навигационной системы. // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2022. №4.
13. **Степанов О.А., Васильев В.А., Литвиненко Ю. А., Исаев А.М.** Учет априорной информации о траектории движения объекта при коррекции показаний навигационной системы по данным о геофизических полях. В сборнике: Юбилейная XXX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. Санкт-Петербург, 2023. С.125-130
14. **Oleg A. Stepanov** Optimal and Suboptimal Filtering in Integrated Navigation Systems in Book Editor(s):Alexander V. Nebylov, Joseph Watson Aerospace Navigation Systems 2016 <https://doi.org/10.1002/9781119163060.ch8>
15. **Анучин О.Н., Емельянцева Г.И.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / под общей ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. СПб: ГИЦ РФ «ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 389 с
16. **И.Б. Вайсгант, Ю.А. Литвиненко** Погрешности выработки навигационных параметров платформенными инерциальными системами среднего класса точности в зависимости от широты места. Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2002. № 9. С. 43.
17. **Распопов В.Я., Матвеев В.В.** Основы построения платформенных инерциальных навигационных систем. // СПб: ГИЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор". 2009. 280 с.
18. **Groves P. D.** Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems, 2nd Ed. Boston: Artech house, 2013.

O. A. Stepanov, Yu.A. Litvinenko, And A.M. Isaev (Concern CSRI Elektropribor, ITMO University, St. Petersburg, Russia).
Approximate Analysis Of Map-Aided Navigation Accuracy For Invariant And Noninvariant Processing Schemes

Abstract. The paper analyzes the map-aided navigation problem with scalar gravimetric measurements solved with invariant and noninvariant processing schemes. An approximate procedure is proposed, which helps analyze the influence of errors of each data source on the accuracy of different solution options. An example used to illustrate the proposed procedure is described.

A confidence assessment method for positioning errors in gravity-aided navigation

Shuaipeng Gao
School of Instrument Science
and Engineering
Southeast University
Nanjing, China
gsp0803@seu.edu.cn

Tijing Cai
School of Instrument Science
and Engineering
Southeast University
Nanjing, China
caitij@seu.edu.cn

Abstract—In the realm of gravity-aided navigation, the reliability of results generated by the TERCOM (Terrain Contour Matching) method can be influenced by the stochastic properties of gravity field distributions and measurement noise. This study presents an innovative method to assess the confidence level of TERCOM outcomes. By conducting polynomial regression on historical TERCOM results, we create a fitting curve. The confidence level of the current result is then determined by evaluating its discrepancy from the fitting curve in terms of its percentile rank within historical discrepancies. Simulated experiments validate the utility of this approach, revealing a pronounced negative correlation between confidence levels and true positional errors, with a Spearman correlation coefficient of -0.8995.

Keywords—gravity-aided navigation, TERCOM, confidence levels

I. INTRODUCTION

While traditional navigation systems, such as the Global Positioning System (GPS), excel in open areas, their efficacy diminishes considerably in areas like deep-sea environments, subterranean zones, and other GPS-obscured regions. Moreover, the errors to Inertial Navigation Systems (INS) tend to accumulate over time, necessitating periodic maintenance and calibration to uphold their precision and reliability. Amidst the rapid advancements in contemporary navigation technologies, gravity-aided navigation has emerged as a focal point [1]. This navigation approach exploits Earth's gravity field information, aligning real-time gravity measurements with a known gravity map to achieve precise positioning [2]. Remarkably, this modality operates independently of electromagnetic or adversarial interference, thereby presenting a robust anti-jamming solution for military applications.

Gravity-aided navigation systems are fundamentally composed of INS, gravimeters, a gravity map, and gravity matching algorithms. TERCOM (Terrain Contour Matching), ICCP (Iterative Contour Closed Point) and SITAN (Sandia Inertial Terrain Aided Navigation) are commonly used gravity matching algorithms [3]–[5]. A vast body of research, both domestic and international, has sought to enhance the positioning accuracy of gravity matching navigation algorithms [6]–[8]. However, the randomness of Earth's gravity field and noises in gravity anomaly measurement devices introduce multifaceted challenges to the positioning accuracy [9], [10]. In the absence of genuine positional data, it becomes difficult to ascertain the precision of gravity matching results, consequently affecting the feedback corrections to the INS. Fu innovatively employed adaptive

and robustness factors to modulate the weight of state prediction and measurement information in the SITAN algorithm, achieving a simulation positioning accuracy of 1.31 n miles [11]. Li introduced a method wherein the discrepancy between the matched position's mapped sequence in the gravity map and the actual measured sequence serves as the weight of the matching result. By establishing a regression model based on the variance of the sequence differences and the matching precision, reliable gravity matching outputs are incorporated into INS for error correction, suppressing INS positional error by over 30% [12]. Zhao uses the optimal positioning of horizontal-and-vertical pre-matching lines to realize the adaptive transfer of the domain center from the INS-indicated ending point to the online optimal matching position, which contributes to improving the matching efficiency and out-of-domain positioning reliability of underwater gravity matching navigation [13]. Gao leveraged the distinct features of gravity field distributions, adopted parallel computations using various algorithms, applied different matching results in distinct gravity regions, thereby enhancing the positioning accuracy and robustness of gravity-aided navigation [14]. To more effectively employ gravity navigation for INS error rectifications, a quantified study on the confidence level of gravity matching results is imperative.

Building on the aforementioned challenges in gravity-aided navigation, this paper introduces a novel approach to gauge the confidence level of gravity matching results of TERCOM. Drawing from the historical matching outcomes of the TERCOM method, a reference trajectory of the carrier's motion is delineated via polynomial regression. Subsequently, the shortest distance between all matching outcomes and the fitting curve is computed to represent the matching positional error. The confidence level of the current match is ascertained by benchmarking its error against the historical percentile ranks of matching discrepancies. In scenarios where the true position is unknown, this quantitative methodology furnishes a concrete way of reference for assessing the precision of gravity matching results.

II. METHODOLOGY

A. Principle of TERCOM method

The origins of the TERCOM algorithm can be traced back to the terrain correlation techniques proposed by Chance-Vought in the latter half of the 20th century. The principle of this algorithm is depicted in Fig. 1. During the course of a vehicle's movement, a tri-dimensional data sequence—comprising longitude, latitude, and altitude—is obtained through altimetric radar and INS. If the initial position of the vehicle is unknown, and the short-term error divergence of the INS is relatively minimal, the altitude measurements can be

cross-referenced with pre-stored topographic maps to discern the vehicle's true location.

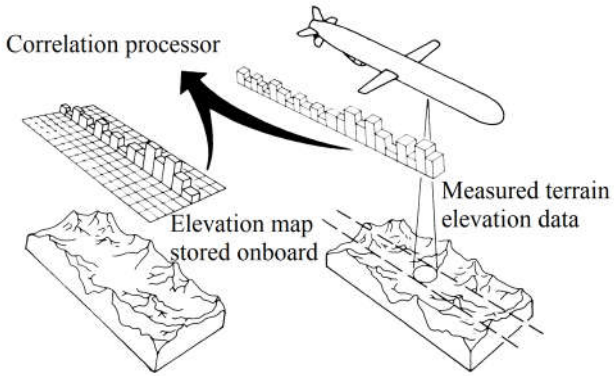


Fig. 1. Principles of the TERCOM Method.

Given the analogous positioning principles underpinning terrain and gravity navigation, the TERCOM method can be applied into gravity matching processes. Hypothetically, as a submarine navigates, it chronicles both its trajectory coordinates of INS and gravity measurements at regular intervals, either spatially or temporally. This results in INS trajectory and gravity measurement sequences, denoted as (P_1, P_2, \dots, P_N) and $(\tilde{g}_1, \tilde{g}_2, \dots, \tilde{g}_N)$ respectively, where N represents the length of the trajectory sequence. By overlaying the trajectory sequence onto a gravity map, one obtains the gravity anomaly reference sequence (g_1, g_2, \dots, g_N) . Subsequently, by translating the trajectory sequence within a defined ambit, multiple gravity anomaly reference sequences can be derived.

A prevalent metric for evaluating the correlation between the gravity anomaly reference sequences and the measured gravity sequence is the MSD (Mean Square Difference). To mitigate the impact of systematic errors between gravity measurements and values derived from the gravity map, this study introduces an enhancement to the MSD computation formula, utilizing the gravity anomaly variations. The discrete formulation for this correlation metric is defined as follows:

$$J_{\text{MSD}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left((\tilde{g}_i - \tilde{g}_1) - (g_i - g_1) \right)^2 \quad (1)$$

Each gravity anomaly reference sequence correlate with a trajectory sequence in the translating ambit. By computing the association between the gravity anomaly reference sequences and the measured gravity sequence, one can identify the reference sequence with the highest correlation, thereby determining the current point in trajectory sequence as the outcome of gravity-aided navigation.

$$\hat{P}_t^{\text{MSD}} = \arg \max_{P_N} J_{\text{MSD}} \quad (2)$$

B. Confidence levels of TERCOM outcomes

During continuous matching with the TERCOM algorithm, the positioning results are influenced by the distribution of the gravity field and the noise in gravity anomaly measurements, yielding positional estimates that exhibit a stochastic dispersion around the true location. In scenarios where the true position of the submarine remains unknown, the precision of the current result is indeterminate. This study capitalizes on

historical matching results from the TERCOM method. By employing polynomial regression, a reference trajectory is derived, serving as a benchmark to evaluate the confidence level of current matching outcomes.

During the matching computational procedure, positions from each result are chronicled, aggregating into a historical dataset $\{\hat{P}_t = (x_t, y_t)\}_{t=1}^M$ situated within a two-dimensional space, delineating the spatial distribution of matching outcomes, where M denotes the volume of data in the historical dataset. The matching trajectory curve is articulated using polynomial regression, with the fitting model denoted as follows:

$$f(x, \mathbf{a}) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \quad (3)$$

The squared vertical distance function from the historical dataset to the fitted trajectory curve is defined as follows:

$$\begin{aligned} \varphi(\mathbf{a}) &= \|\mathbf{y} - \mathbf{Xa}\|^2 \\ &= \left\| \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_1^n \\ 1 & x_2 & \dots & x_2^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_M & \dots & x_M^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \right\|^2 \\ &= (\mathbf{y} - \mathbf{Xa})^T (\mathbf{y} - \mathbf{Xa}) \end{aligned} \quad (4)$$

Herein, $\|\bullet\|$ represents the square of the L2 norm.

To identify the optimal coefficient vector \mathbf{a} that obtains the minimal value of $\varphi(\mathbf{a})$, it's imperative to derive the partial derivative of the squared vertical distance function with respect to the coefficient vector. Setting the partial derivative to zero, the model's coefficient vector \mathbf{a} should satisfy:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{a}} = -2\mathbf{X}^T (\mathbf{y} - \mathbf{Xa}) = 0 \quad (5)$$

Consequently:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{Xa} = \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (6)$$

One can calculate the optimal coefficient vector \mathbf{a} with (6), subsequently deriving the polynomial function that fits the matching trajectory curve. In instances where the historical dataset comprises a limited number of samples, indicative of a shorter runtime for matching computations, the submarine motion trajectory approximates a linear path, making linear regression an appropriate choice. This helps reduce computational demands, offering simplicity and facilitating hardware implementation. As the dataset expands, higher-order polynomial functions or segmental fitting process may be employed to closely emulate the true submarine trajectory.

It's noteworthy that the fitting polynomial function is not temporal. It merely characterizes the shape of the submarine's motion trajectory without representing specific time information from the historical dataset. Employing the vertical distance to the fitted curve as a measure of matching error would imply that discrepancies lie solely in latitude, rendering the longitudinal error negligible. It is a deviation from reality. Hence, this study adopts the shortest distance from the historical dataset to the fitted curve as a more apt approximation for positional errors in matching results.

Suppose that a point $(x'_i, f(x'_i, \mathbf{a}))$ on the fitted curve is the closest to the historical matching position $\hat{\mathbf{P}}_i = (x_i, y_i)$, considered as the trajectory point corresponding to the same moment as the historical matching position. The directional vector between these two points should be orthogonal to the derivative direction of the curve at that point, formalized as:

$$\vec{d}_i \cdot \vec{v}_i = \begin{bmatrix} x_i - x'_i & y_i - f(x'_i, \mathbf{a}) \\ f'(x'_i, \mathbf{a}) \\ -1 \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

Consequently, $|\vec{d}_i|$ represents the minimal distance from the matching position to the curve. Upon obtaining the polynomial fitted curve, the shortest distances from each historical matching position to the curve are computed.

The mean distance from all historical matching positions to the curve is then evaluated as:

$$\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |\vec{d}_i| \quad (8)$$

Where $|\vec{d}_i|$ does not adhere to a normal distribution.

Given these conditions, one must resort to non-parametric methods to ascertain the confidence level of the current matching result. In this study, the confidence level is defined by the percentile rank of the current matching position's shortest distance $|\vec{d}_{M+1}|$ to the fitted curve within the historical dataset:

$$C = \left(1 - \frac{\text{rank}(|\vec{d}_{M+1}|)}{M} \right) \times 100\% \quad (9)$$

Where $\text{rank}(\bullet)$ symbolizes the rank of the data following sorting. This confidence level is dimensionless and signifies the likelihood of the submarine's true position residing within a rectangular confidence interval which is centered at the current result's position with a semi-length of μ .

If there are matching errors between the matching results and the GPS position, the confidence level for matching results, as proposed in this work, is anticipated to exhibit a negative correlation with matching errors. By analyzing the correlation between the confidence level and matching errors, the efficacy of the proposed confidence computation method can be assessed. This study employs the Spearman rank correlation coefficient to quantify the correlation magnitude between two discrete data sets:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum (\text{rank}(A_i) - \text{rank}(B_i))^2}{n(n^2 - 1)} \quad (10)$$

The range of r_s lies between $[-1, 1]$. $r_s = 1$ signifies a perfect positive correlation between sequence A and sequence B , $r_s = -1$ indicates a perfect negative correlation, and $r_s = 0$ suggests the absence of a monotonic relationship. Therefore, a value of r_s approaching -1 underscores a negative correlation between the derived confidence level and matching errors in scenarios where the magnitude of matching errors remains unpredictable. This corroborates the

appropriateness of the confidence calculation method proposed herein.

III. EXPERIMENT

The gravity map utilized for the experiment boasts a resolution of $1' \times 1'$. The experimental navigation data utilized originates from authentic measurements within a specific maritime region. Throughout the navigation, the survey vessel was equipped with a gravimeter exhibiting a precision of 1 mGal, and the INS updated its position at a frequency of 1 Hz. The initial errors in both longitude and latitude of INS were set at $1'$. Concurrently, GPS data was gathered as the true trajectory of the vessel, facilitating the computation of errors in the matching results. The vessel navigated for a total of 7.5 hours, maintaining an average speed of 6.4 m/s, with 80 trajectory points recorded.

For the TERCOM methodology, the matching sequence length was established at 10, with an interval of 2 km between matching points. The trajectory was translated within a square range of 10 km on each side. Continuous matching was executed using a sliding window approach. The trajectory of the matching results is illustrated in Fig. 2, and the positioning errors relative to GPS are depicted in Fig. 3.

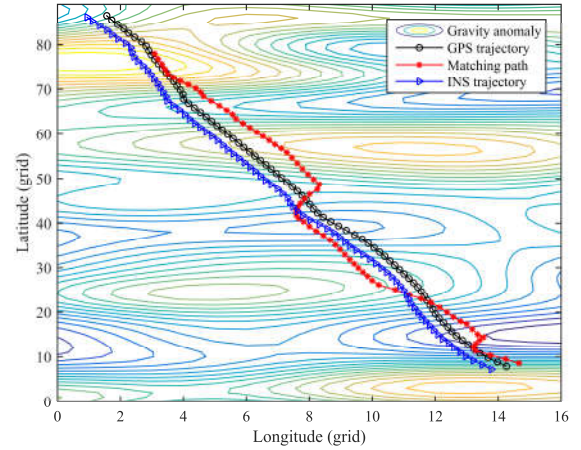


Fig. 2. Navigational trajectory.

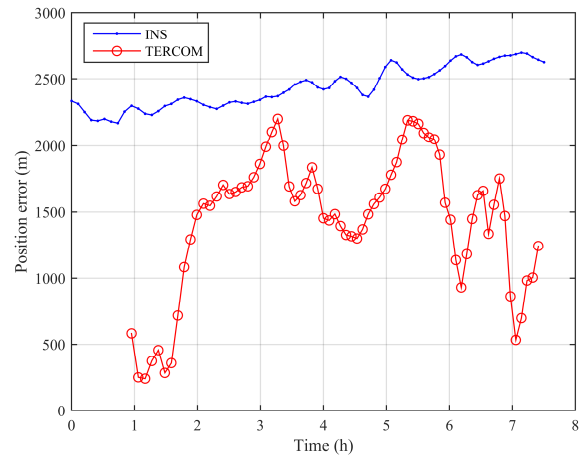


Fig. 3. Positioning errors.

From Fig. 2 and Fig. 3, it is evident that the TERCOM algorithm effectively mitigates the errors of INS. The matching outcomes are randomly distributed on both sides of

the carrier's true trajectory. In the absence of additional constraints, consecutive matching results are mutually independent. When $M \geq 50$, the proposed method in this study is employed to determine the confidence levels for the subsequent 30 matching outcomes.

To validate the effectiveness of the computed confidence levels by contrasting them against the matching positional errors, we normalize the errors of these 30 matching outcomes using the following formula.

$$NOR_{e_i} = \frac{e_i}{e_{\max}}, i = 51, \dots, 80 \quad (11)$$

Subsequently, the relationship between the matching results and the normalized positional errors for the last 30 trajectory points is depicted in Fig. 4.

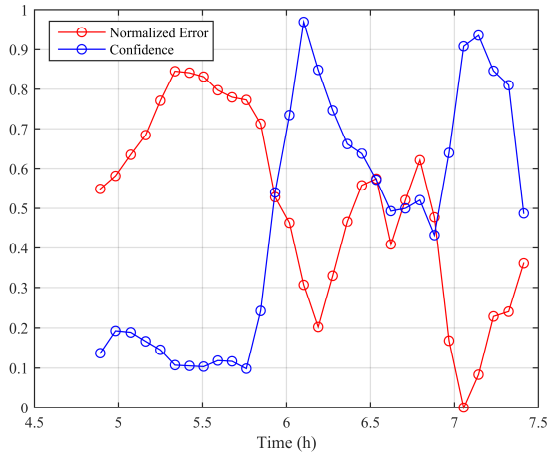


Fig. 4. Confidence level and normalized positional error.

From Fig. 4, it is evident that when the normalized positional errors are relatively large, the confidence level of the matching results is correspondingly low. The monotonic variation of the error curve exhibits an inverse trend with the confidence level curve. Utilizing (10), the Spearman rank correlation coefficient between the positional errors and their confidence levels for the last 30 matching results is calculated to be $r_s = -0.8995$, indicating a strong negative correlation between the two.

IV. CONCLUSION

In situations where the true position of the carrier is inaccessible, this study introduces a method to evaluate the confidence level of matching results based on historical data. By determining the percentile rank of the discrepancy between the current matching result and the fitted curve, the confidence regarding the proximity of the true position to the matching result is conveyed. Experimental findings underscore that there is a pronounced negative correlation between the

confidence level of the matching results and their positional errors relative to the GPS. This methodology furnishes reliable weighting information for gravity matching outcomes, proving to be efficacious for INS positional corrections.

REFERENCES

- [1] W. Zheng, Z. Li, and F. Wu, "Research progress of the underwater gravity-aided navigation based on the information of aerospace-marine integration," *Journal of National University of Defense Technology*, vol. 42, no. 3, pp. 39–49, 2020.
- [2] A. JIRCITANO and D. DOSCH, "Gravity aided inertial navigation system," in *Institute of navigation: proceedings of the forty-seventh annual meeting: navigation and exploration*, WILLIAMSBURG, VA, 1991, pp. 221–229.
- [3] Y. Han, B. Wang, Z. Deng, and M. Fu, "An Improved TERCOM-Based Algorithm for Gravity-Aided Navigation," *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 16, no. 8, pp. 2537–2544, Apr. 2016.
- [4] F. Liu, F. Sun, and Y. Cheng, "Gravity Localization Based on ICCP Algorithm and Its Generalization," *Journal of Chinese inertial technology eng*, vol. 12, no. 5, pp. 36–39, 2004.
- [5] D. Xu, Y. Wang, H. Wang, X. Cai, and Q. Dai, "Results analysis of vertical gradient of gravity and gravity anomaly aided navigation with sitan algorithm," *Journal of Geodesy and Geodynamics*, vol. 31, no. 1, pp. 127–131, 2011.
- [6] X. Chen, G. Jiang, and J. Chen, "The Application of Ant Colony Algorithm in Gravity Matching of Aid Navigation," *Journal of Air Force Engineering University*, vol. 23, no. 6, pp. 79–83, 2022.
- [7] S. Zhao, X. Xiao, Y. Wang, and Z. Deng, "An Improved Particle Filter Based on Gravity Measurement Feature in Gravity-Aided Inertial Navigation System," *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 23, no. 2, pp. 1423–1435, Jan. 2023.
- [8] Z. Ma, B. Wang, L. Huang, F. Cui, Z. Deng, and M. Fu, "Dimension-Expanded-Based Matching Method With Siamese Convolutional Neural Networks for Gravity-Aided Navigation," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 70, no. 10, pp. 10496–10505, Oct. 2023.
- [9] X. Li, X. Zhou, and J. Gong, "Factor influencing mechanism modeling and test validation of gravity map matching navigation," *Journal of Chinese Inertial Technology*, vol. 29, no. 6, pp. 777–781, 2021.
- [10] B. Wang, T. Cai, and K. Fang, "The Quantification Method of Matching Capability of Areas in Gravity-Aided Inertial Navigation," *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 22, no. 21, pp. 20958–20967, Nov. 2022.
- [11] L. Fu, D. Zhao, and L. Fu, "Underwater Gravity Matching Navigation Method Based on Robust Adaptive SITAN Algorithm," *Journal of Geodesy and Geodynamics*, vol. 43, no. 8, pp. 820–825, 2023.
- [12] X. Li, S. Chen, X. Zhou, J. Gong, and J. Wang, "Gravity matching algorithm for real-time correction during voyage," *Journal of Chinese Inertial Technology*, vol. 31, no. 4, pp. 352–358, 2023.
- [13] S. Zhao, W. Zheng, Z. Li, H. Zhu, and A. Xu, "Improving Matching Efficiency and Out-of-Domain Positioning Reliability of Underwater Gravity Matching Navigation Based on a Novel Domain-Center Adaptive-Transfer Matching Method," *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, vol. 72, p. 1001811, 2023.
- [14] S. Gao and T. Cai, "Parallel Multiple Methods with Adaptive Decision Making for Gravity-Aided Navigation," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 8, p. 1624, 2023.

Influence Mechanism Analysis of Position Error for Underwater Long-duration INS

Meng Liu^{*1,2}, Xiaoming Zhao^{1,2}, Chongmeng Zhang^{1,2}, Yongzhao Wang^{1,2}

¹Tianjin Navigation Instrument Research Institute

Tianjin, China

²Laboratory of Science and Technology on Marine Navigation and Control

China state Shipbuilding Corporation

Tianjin, China

liumeng_0304@163.com

Abstract—The improvement of autonomous positioning capability of inertial navigation system (INS) is the premise and foundation of the underwater navigation positioning capability. Aiming at the accumulation divergence problem of the long-duration INS position errors with time, the influence mechanism of the position error is analyzed in this paper. The position error of the Long-duration INS can be decomposed into longitude error and latitude error. And the longitude error is accumulative divergence with time, whereas the latitude error is a 24hour period oscillation divergence with time. The simulation analysis shows that the accumulation divergence problem of the Long-duration INS position errors can be simply transformed into the problem of the correction and compensation for the gyroscope error constant parameter ε_y and ε_z , and the suppression problem for the gyroscope random drift. Finally, the suggestions are put forward for the future development of the underwater long-duration high-accuracy inertial navigation system.

Keywords- underwater long-duration inertial navigation system (INS); position errors of INS; longitude error; latitude error; underwater navigation technology

I. INTRODUCTION

The underwater navigation technology provides positioning information for AUV and other underwater unmanned systems, which is the important guarantee of sailing security and tasks execution [1]. With the development of underwater unmanned vehicles and marine resources, the underwater navigation technology has become a research focus and is usually required with long-duration, high precision to meet the continuous operation for several days to several months [2]. Due to the underwater environmental characteristics, however, the common navigation methods would not be used in underwater, such as the Global satellite navigation and celestial navigation and so on [3,4]. As a result, the underwater navigation means are scarce relatively.

The common underwater navigation methods mainly include multi-physical field matching navigation, acoustic navigation, inertial navigation system (INS) and so on [3,5]. With the earth physical field map, such as gravity,

geomagnetic and terrain, the physical characters can be utilized to locate in the multi-physical field matching navigation [6,7]. As a result, the multi-physical field matching navigation is a passive, independent, covered, high precision and anti-jamming navigation system, and the navigation errors do not diverge with time [8,9]. However, the multi-physical field matching navigation is closely related to physical characters and is usually used as an assistant navigation method to integrate with the INS, which is an ideal way to correct INS. Whereas the sound wave is the only effective carrier of transmitting underwater information [10-12]. The acoustic navigation is the key navigation technology for the underwater vehicles, and attain bounded-error navigation through range or angle observations to beacons with known position, such as long baseline, short baseline, ultra short baseline approaches. However, the available acoustic navigation system has a limited range (about 10km) and is usually only suitable for regional positioning.

Currently, the INS has been widely used for the positioning and navigation of underwater vehicles because it has particular advantages, such as high autonomy, concealment, continuum, insusceptible climate, and the successive supply of position, velocity, and attitude (PVA) information [13,14]. With the consideration of the self-contained requirement of the Navy protocol and doctrine, on the other hand, an INS is strongly recommended for underwater navigation. Thereby, the INS becomes an optimal navigation technique for civil and military underwater navigation to meet the requirement of long-duration, high precision [4]. However, the INS position errors are accumulation divergence with time. For the underwater unmanned vehicles, the INS is usually required to work continuously for several days to several months, and the excessive divergence of the INS position errors would lose the navigation ability.

As a result, the improvement of autonomous positioning capability of INS is the premise and foundation of the underwater navigation positioning capability. Since the 1950s, the INS has developed for decades and has made great progress [15,16]. At present, the positioning accuracy of the underwater INS is better than 2nmile/30days in

strategic nuclear submarine, whereas the positioning accuracy of the underwater INS is better than 2nmile/14days in attack nuclear submarine [17,18]. Aiming at the accumulation divergence problem of the long-duration INS position errors with time, the influence mechanism of the position error is analyzed in this paper.

The rest of this paper is organized as follow. The principle of INS and the positioning error model are presented in Section II. In Section III and IV, the influence mechanism of the Long-duration INS position errors including longitude error and latitude error is simulated and analyzed. Finally, the conclusions and the suggestions are put forward for the future development of the long-duration high-accuracy inertial navigation system in Section V.

II. THE PRINCIPLE OF INS AND THE POSITIONING ERROR MODEL

INS is a dead-reckoned (DR) navigation solution with the gyroscopes and accelerometers to measure angular velocity and linear acceleration respectively. Then, the position and orientation of an object can be tracked with the known starting point, orientation and velocity [15]. With the mounting reference frame for inertial measurement unit (IMU), the INSs can be divided into two categories, such as platform INS and strapdown INS. with the capacity of self-compensating of IMUs, the INSs can be divided into non-rotating modulated INSs and rotating modulated INSs. And the rotating modulated INSs include the single-axis rotating modulated INS, double-axis rotating modulated INS. Even so, all INSs can be equivalent to three orthogonal rate-gyroscopes and three orthogonal accelerometers in the East-North-Up geographic frame (E-N-U frame, namely the local geographic frame, g -frame) to calculate the vehicle position, as shown in Figure 1.

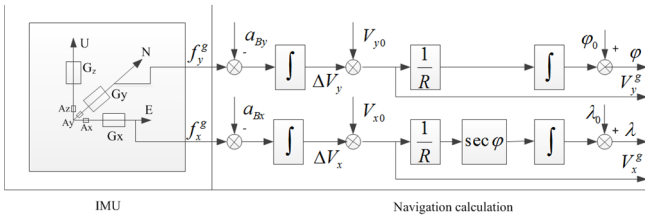


Fig. 1. The equivalent of INSs in the East-North-Up geographic frame.

As shown in Figure 1, G_x, G_y, G_z and A_x, A_y, A_z denote the three rate-gyroscopes and accelerometers in E-N-U frame; V_{x0}, V_{y0} and λ_0, ϕ_0 denote the known starting velocity and point; R denotes the radius of Earth. And the navigation calculation equations can be written as:

$$V^g = f^g - (2\omega_{ie}^g + \omega_{eg}^g) \times V^g + g^g \quad (1)$$

$$\dot{\phi} = \frac{V_N}{R} \quad (2)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{V_E \sec \phi}{R} \quad (3)$$

where, V^g is the vehicle velocity in the E-N-U frame; $(*\times)$ denotes the skew symmetric matrix of $(*)$; $\omega_{ie}^g = [0 \quad \Omega \cos \phi \quad \Omega \sin \phi]^T$, Ω is the angular rate of Earth's rotation, $\omega_{eg}^g = [-V_N/R \quad -V_E/R \quad -V_E \tan \phi/R]^T$;

V_E and V_N denote the East velocity and North velocity, respectively; ϕ and λ denote the latitude and longitude of vehicle.

Furthermore, the position error model of long-duration INS can be given. Since the underwater INS usually is operated in a horizontally damped state, the position error model of long-duration INS including only the Earth period (24h) oscillation is shown as follow [19,20]:

$$\left\{ \begin{aligned} \delta\phi &= \frac{\varepsilon_x \sin(\Omega t)}{\Omega} + \frac{\varepsilon_y \sin L(1 - \cos(\Omega t))}{\Omega} \\ &\quad - \frac{\varepsilon_z \cos \phi(1 - \cos(\Omega t))}{\Omega} + \alpha \cos(\Omega t) \\ &\quad + \beta \sin \phi \sin(\Omega t) - \gamma \cos \phi \sin(\Omega t) + \delta\phi_0 \cos(\Omega t) \\ \delta\lambda &= \frac{\varepsilon_x \sin \phi(1 - \cos(\Omega t)) \sec \phi}{\Omega} - \varepsilon_y \cos \phi \cdot t \\ &\quad + \frac{\varepsilon_y \sin \phi \tan \phi \sin(\Omega t)}{\Omega} - G_z \sin \phi \cdot t - \frac{\varepsilon_z \sin \phi \sin(\Omega t)}{\Omega} \\ &\quad + \alpha \tan \phi \sin(\Omega t) + \beta \sin \phi \tan \phi(1 - \cos(\Omega t)) \\ &\quad - \gamma \sin \phi(1 - \cos(\Omega t)) + \delta\phi_0 \tan \phi \sin(\Omega t) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

where $\delta\phi$ and $\delta\lambda$ is the latitude error and the longitude error respectively; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ and ε_z denote the constant gyroscope drifts expressed in E-N-U frame; α, β and γ denote the initial attitude error; $\delta\phi_0$ denote the initial latitude error; t is the operating time.

From Equation (4), we can see that the position errors of the long-duration INS contain the 24h period oscillation term and the accumulation divergence errors with time. And the 24h period oscillation errors of latitude and longitude are influenced by not only gyroscope drifts, but also the initial attitude error and the initial latitude error. Since the influence mechanism of 24h period oscillation errors of latitude and longitude is coincide. If there is no special explanation, only the 24h period oscillation error of latitude is discussed in following. Moreover, only the longitude error influenced by constant gyroscope drifts ε_y and ε_z is accumulation divergence with the time.

As a result, the position error of the Long-duration INS can be decomposed into longitude error and latitude error. And the longitude error is accumulative divergence with time, whereas the latitude error is a 24hour period oscillation divergence with time. In following, the influence mechanism of the longitude error and latitude error are simulated and analyzed, respectively.

III. THE INFLUENCE MECHANISM ANALYSIS OF LONGITUDE ERROR

The accumulative divergence of longitude error is influenced by the constant gyroscope drifts ε_y and ε_z . And the constant gyroscope drifts ε_y and ε_z can be decomposed into constant error ($\varepsilon_{y0}, \varepsilon_{z0}$), constant residual error ($\varepsilon_{y0r}, \varepsilon_{z0r}$), and constant change error ($\delta\varepsilon_y, \delta\varepsilon_z$), and can be expressed as Equation (5).

$$\begin{cases} \varepsilon_y = \varepsilon_{y0} + \varepsilon_{y0r} + \delta\varepsilon_y \\ \varepsilon_z = \varepsilon_{z0} + \varepsilon_{z0r} + \delta\varepsilon_z \end{cases} \quad (5)$$

where the constant error can be calibrated in factory or periodically; the constant residual error is the startup errors; the constant change error is the variation during long voyages.

A. Position Errors of Long-duration INS without Compensation of Constant Gyroscope Drifts

Figure 2 shows that the position errors of static semi-physical simulation for long-duration INS without compensation of constant gyroscope drift. The sampling frequency of IMU is 200Hz. The gyro constant drift and the accelerometer constant bias of test IMU are less $0.0003^\circ/h$ and $10\mu g$, respectively. The maximum longitude error is 12.96nmile in the 30 days. The navigation error is a very large value, and the underwater navigation positioning capability is lost.

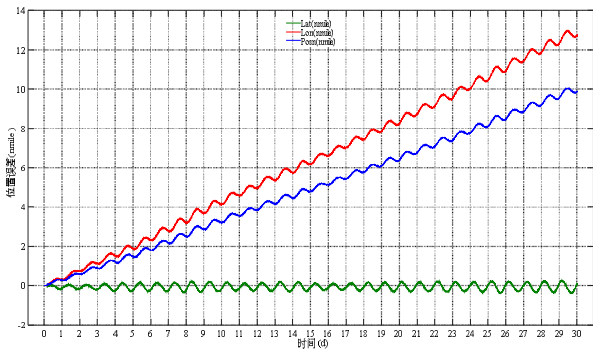


Fig. 2. The position error curve of long-duration INS without compensation of the constant gyroscope drifts.

B. Position Errors of Long-duration INS with Compensation of Constant errors ε_{y0} and ε_{z0}

From Equation (4), the first term of longitude error divergence (namely, $-\varepsilon_y \cos\phi t - \varepsilon_z \sin\phi t$) is determined by the constant gyroscope drifts. Then, the constant errors ε_{y0} and ε_{z0} can be calculated to compensate the long-duration INS. As a result, the position error curve of long-duration INS with compensation of constant errors ε_{y0} and ε_{z0} is shown in Figure 3. The maximum longitude error is 2.68nmile in the 30 days. Compared with no compensation, the navigation accuracy is improved by 5 times, and is promoted greatly.

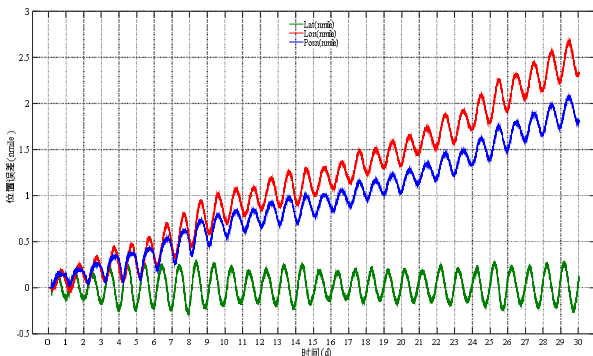


Fig. 3. The position error curve of long-duration INS with compensation of the constant errors ε_{y0} and ε_{z0} .

C. Position Errors of Long-duration INS with Compensation of Constant Residual Errors ε_{y0r} and ε_{z0r}

From Figure 3, the longitude error is still divergence in the early stages of navigation, such as during the 1-3 days. The main reason for this phenomenon is the startup error of gyroscope. With the starting of INS, the constant residual error can be calculated. Figure 4 shows the longitude error curve for long-duration INS with compensation of the constant residual errors ε_{y0r} and ε_{z0r} , whereas the position error curve is shown in figure 5.

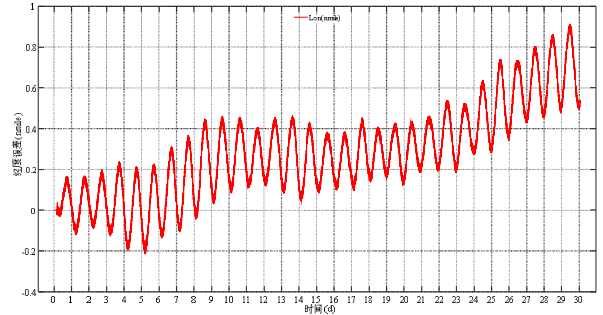


Fig. 4. The longitude error curve of long-duration INS with compensation of the constant residual errors ε_{y0r} and ε_{z0r} .

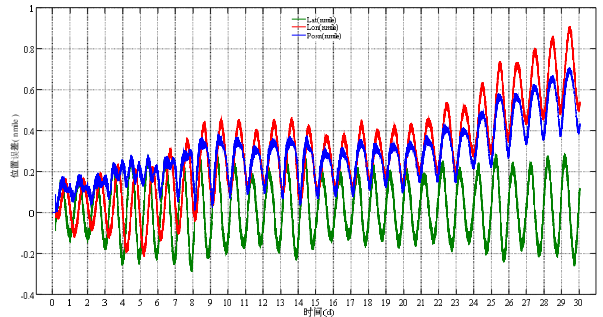


Fig. 5. The position error curve of long-duration INS with compensation of the constant residual errors ε_{y0r} and ε_{z0r} .

From figure 4, the longitude error has almost no divergence tendency during the 1-3 days navigation stages. As a result, the constant residual error is compensated perfectly. As shown in Figure 5, the maximum longitude error is 0.91nmile in the 30days. Compared with no compensation, the navigation accuracy is improved by 3 times.

D. Position Errors of Long-duration INS with Compensation of Constant Change Errors $\delta\varepsilon_y$ and $\delta\varepsilon_z$

The constant change error is the variation of constant gyroscope drifts caused by the movement environment of vehicle and the changing physical field (namely, electricity, magnetism and heat) during long voyages. Therefore, the constant change error is usually estimated beforehand.

With the off-line data and the post-processing, the constant change error $\delta\varepsilon_y$ and $\delta\varepsilon_z$ can also be calculated. Figure 6 shows the position error curve for long-duration INS with compensation of the constant change errors $\delta\varepsilon_y$ and $\delta\varepsilon_z$. From Figure 6, the divergence tendency of the position error can be suppressed completely. Only the 24h period oscillation error is left. The maximum position error is 0.4nmile in the entire 30days voyages.

Compared with no compensation, the navigation accuracy is improved by 2 times.

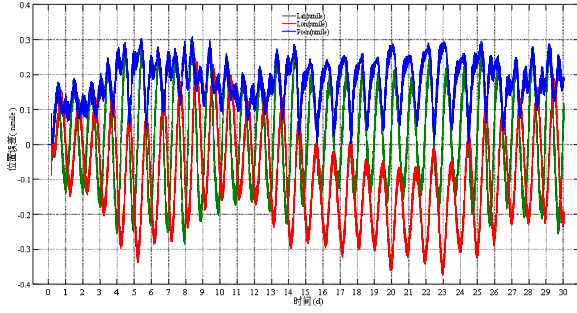


Fig. 6. The position error curve of long-duration INS with compensation of the constant change errors $\delta\varepsilon_y$ and $\delta\varepsilon_z$.

In long-duration INS, only the longitude error is accumulative divergence with time. Nevertheless, the divergence tendency of the longitude error can be suppressed completely with compensation of the constant gyroscope drifts ε_y and ε_z . As a result, the accumulation divergence problem of the long-duration INS longitude errors can be simply transformed into the problem of the correction and compensation for the gyroscope error constant parameter ε_y and ε_z .

IV. THE INFLUENCE MECHANISM ANALYSIS OF LATITUDE ERROR

A. The 24h Period Oscillation Error of Latitude Caused by Constant Errors

According to the above analysis, the constant errors influencing on the 24h period oscillation error of latitude mainly include the constant gyroscope drifts, initial attitude errors and the initial latitude error. The simulations are performed to analysis the influence in this section.

The gyro and accelerometer outputs are generated by static long-duration INS simulator. The main parameters are as follows: the constant of gyroscope are $0.0003^\circ/h$, and the random drifts of gyroscope are Gaussian random white noise and the value is $0.0001^\circ/h$. The constant biases of accelerometer are $10\mu g$, and the random biases of accelerometer are Gaussian random white noise and the value is $5\mu g$. The initial values of attitude relative to E-N-U frame are all set to be zero. The initial longitude and latitude are $(117^\circ, 39.18^\circ)$. The initial latitude error is set to 10m. The simulation lasts for 30 days. The update frequency of IMU data is 200 Hz. Then, the navigation calculation with the horizontally damping is conducted. Figure 7 shows the latitude error curve of 30 days static simulation for long-duration INS.

From figure 7, we can see that the 24h period oscillation error of latitude is always the constant oscillation in the 30 days. Compared with the latitude oscillation error in figure 6, the oscillation amplitude is also very small, only 0.02nmile. As a result, the 24h period oscillation error of latitude influenced by the constant errors is very small in long-duration INS. Furthermore, we can conclude that the constant gyroscope drifts, initial attitude errors and the initial latitude error have some influence on the 24h period oscillation error of latitude, but it is not the main factor.

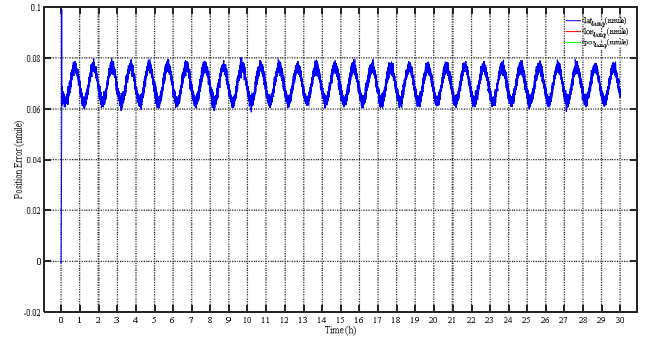


Fig. 7. The latitude error curve of 30 days static simulation for long-duration INS.

B The 24h Period Oscillation Error of Latitude Caused by the Colored Random Drift Error of Gyroscope

The above simulation mainly analyzes the influence of constant error on latitude oscillation. And the random drifts of gyroscope are set Gaussian random white noise. In fact, however, the gyroscope output is not completely white noise, but the colored noise. As a result, the simulations of 24h period oscillation error of latitude caused by the colored random drift error of gyroscope are carried in this section.

Here, the colored random drift error of gyroscope is described by the first order Markov process. The discrete time forms of the colored random drift error of gyroscope can be written as:

$$m(k) = e^{-\Delta T/T_m} m(k-1) + \omega_m(k) \quad (6)$$

where $m(k)$ is the first order Markov process sequence; T_m is its correlation time and is set by 3600s; ΔT is the sampling interval; $\omega_m(k)$ denotes the driving white noise.

With the same of simulation parameters, the navigation calculation with the horizontally damping is conducted similarly. Then the latitude error curve of 30 days static simulation for long-duration INS with the colored random drift error is shown in figure 8.

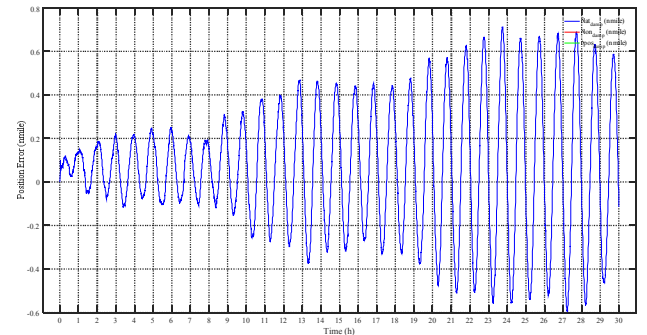


Fig. 8. The latitude error curve of 30 days static simulation with the colored random drift error.

From figure 7, we can see that the latitude error is also a 24hour period oscillation divergence with time. The maximum oscillation error is 0.72nmile in the 30 days. It is much larger than other constant error's effects. For the undamped INS, the oscillation error influenced by the colored random drift error would also increase accumulatively. Since the long-duration INS is operated in

the horizontally damping and cannot realize the azimuth damping, the position error caused by gyroscope random drift would accumulate with time. And then, the latitude error is oscillation divergence with the 24hour period.

V. CONCLUSIONS

In this paper, the influence mechanism of the position error for the Long-duration INS is analyzed. The position error of the Long-duration INS can be decomposed into longitude error and latitude error. And the longitude error is accumulative divergence with time, whereas the latitude error is a 24hour period oscillation divergence with time. Then the influence mechanism of the Long-duration INS position errors including longitude error and latitude error is simulated and analyzed. With the compensation of the constant gyroscope drifts ε_y and ε_z , the divergence tendency of the position error can be suppressed completely. Compared with gyroscope random drift, the influence of the constant errors on the 24h period latitude oscillation divergence error can be neglected. As a result, the accumulation divergence problem of the Long-duration INS position errors can be simply transformed into the problem of the correction and compensation for the gyroscope error constant parameter ε_y and ε_z , and the suppression problem for the gyroscope random drift.

For the future development of the underwater long-duration high-accuracy INS, on the other hand, we have the following suggestions. (1) the identification method of the compensation parameters ε_y and ε_z can be optimized further to improve the navigation accuracy maximally. (2) the influence mechanism of the low random drift for high precision gyroscope should be studied to restrain the 24h period latitude oscillation divergence error.

REFERENCES

- [1] Miller P A, Farrell J A, Zhao Y Y, et al. Autonomous Underwater Vehicle Navigation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, 35: 663-678.
- [2] Yao Y Q, Xu X S, Li Y, et al. A Hybrid IMM Based INS/DVL Integration Solution for Underwater Vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology(Early Access), 2019.
- [3] Yang Y. Resilient PNT concept frame [J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2019, 2(3):1-7.
- [4] National Security Space Office. National Positioning navigation and timing architecture study final report[R]. USA, 2008.
- [5] Sam W. Remotely Operated Vehicles of the World[M]. 4th ed. USA: Oilfield Publications Limited, 2000.
- [6] Lager M, Topp E A, Malec J. Underwater terrain navigation using standard sea charts and magnetic field maps [C]. 2017 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI) IEEE, 2017: 78-84.
- [7] Chen Z, Zhang Q, Pan M, et al. A New Geomagnetic Matching Navigation Method Based on Multidimensional Vector Elements of Earth's Magnetic Field[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(8): 1289-1293.
- [8] Wang L, Yu L, Qiao N, et al. Analysis and Simulation of Geomagnetic Map Suitability Based on Vague Set[J]. The Journal of Navigation, 2016, 69(5): 1114-1124.
- [9] Dai T, Miao L, Shao H. A Robust Underwater Navigation Method Fusing Data of Gravity Anomaly and Magnetic Anomaly[J]. International Journal of Systems Science, 2019: 1-15.
- [10] Fan S, Liu C, Li B, et al. AUV Docking Based on USBL Navigation and Vision Guidance[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2018: 1437-8213.
- [11] Tong J W, Xu X S, Zhang T, et al. Study on Installation Error Analysis and Calibration of Acoustic Transceiver Array Based on SINS/USBL Integrated System[J]. IEEE Access, 2018(6): 66923-66939.
- [12] Neasham J A, Goodfellow G, Sharphouse R. Development of the "SeaTrac" Miniature Acoustic Modem and USBL Positioning Units for Subsea Robotics and Diver Applications[C]//OCEANS2015. Genova: IEEE, 2015: 1-8.
- [13] Yuan B L, Liao D, Han S L. Error compensation of an optical gyro INS by multi-axis rotation[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23: 025102.
- [14] Lin Y, Miao L, Zhou Z. A high -accuracy initial alignment method based on backtracking process for strapdown inertial navigation system[J]. Measurement, 2022.
- [15] Gan S, Liu Z, Song L, and Zhou T. Development and review of foreign technology in 2021[J]. Navigation positioning and timing, 2022, 9(03):23-30.
- [16] Levinson E, Majure R. Laser Gyro Potential for Long Endurance Marine Navigation, USA, 1980.
- [17] Levinson E, Majure R. Accuracy enhancement techniques applied to the marine ring laser inertial navigator (MARLIN)[J]. Navigation, 1987, 36(9): 64-86.
- [18] Tucker T, Levinson E. The AN/WSN-7B Marine Gyrocompass/Navigator[J]. Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2000:348-357.
- [19] Savage PG. Strapdown analytics: Part 1. Strapdown associates, Maple Plain, 2000.
- [20] Salychev O S. Applied Inertial Navigation: problems and solutions[M]. Moscow, Russia.: BMSTU Press, 2004.

Attitude Subdivision Technology Based on Triaxial High Precision Gyroscope

Guo.H.R, Hu.L.L, Li.L, Wang.J.G

National Key Laboratory of space based Information
Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC
Luoyang, China
3324075193@qq.com

Abstract—In view of the high update rate of inertial navigation attitude required by airborne equipment, combined with quaternion differential theory commonly used in navigation coordinate system calculation, the attitude angle data of carrier is subdivided, the attitude angle update rate is improved, and higher precision data is provided for the subsequent system.

Keywords—Quaternion, Attitude Angle, Gyroscope, Inertial Navigation

1. Introduction

At present, the on-board airborne equipment continuously develops toward the direction of large field of view, high resolution, and long imaging distance, and has an urgent need for high precision inertial navigation system [1]. However, the on-board attitude angle update frequency obtained by the airborne equipment through the bus communication is relatively low, and it is difficult to meet the need of real-time precise positioning of the target. Aiming at further increasing the frequency of relevant information refresh [2], this paper describes the attitude angle of the carrier with quaternion, and subdivides the attitude angle data according to the differential theory of quaternion and the angular velocity data measured by the aircraft Triaxial Gyroscope. At present, the data update rate of the master inertial navigation design is 100 Hz, and the attitude angle update rate after subdivision can reach 500 Hz or even higher.

2. Attitude angle subdivision design

The rotation between coordinate systems can be described by Euler angle, direction cosine, and quaternion. The Euler angle algorithm directly calculates the yaw angle, pitch angle and roll angle by solving the Euler angle differential equation. The relationship of Euler differential equation is simple and clear, the concept of it is intuitive, but it is difficult to calculate in real time. When the pitch angle is close to 90°, the equation is degenerated. Therefore, this method is suitable for the case where the change of horizontal attitude is not large, and not suitable for the

attitude determination of full-attitude vehicle.

Direction cosine method can avoid the problem of equation degeneration in Euler angle method, and can work in full attitude. However, attitude matrix differential equation is essentially a linear differential equation system containing nine unknown quantities, which is difficult to calculate in real time and is not practical in engineering.

The quaternion method only needs to solve four unknown linear differential equations, the computation requirement is smaller than the direction cosine method, and the algorithm is simple and easy to operate. Accordingly, the quaternion method is chosen to describe the rotation between coordinate systems.

2.1 Definition of Quaternion

Quaternions are defined as follows:

$$q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k \quad (q_0, q_1, q_2, q_3 \in \mathbb{R}) \quad (1)$$

And wherein,

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \quad (2)$$

It can be found that the quaternion describes a spatial rotation axis, the vector direction of the axis of rotation is $\{i, j, k\}$, and the module length is:

$$\|q\| = \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} \quad (3)$$

As shown in FIG. 1, after rotation of the arbitrary vector v along the rotation axis u defined as a unit vector by an angle of θ , v' can be described using a unit quaternion:

$$\bar{q} = [\cos(\theta/2), \sin(\theta/2)\bar{u}] \quad (4)$$

Wherein,

$$\begin{cases} q_0 = \cos(\theta/2) \\ q_1 = \sin(\theta/2)u_x \\ q_2 = \sin(\theta/2)u_y \\ q_3 = \sin(\theta/2)u_z \end{cases} \quad (5)$$

The quaternion is converted into a rotation matrix as (6):

$$v' = \begin{bmatrix} 1-2c^2-2d^2 & 2bc-2ad & 2ac+2bd \\ 2bc+2ad & 1-2b^2-2d^2 & 2cd-2ab \\ 2bd-2ac & 2ab+2cd & 1-2b^2-2c^2 \end{bmatrix} v \quad (6)$$

It can be seen that quaternion can describe the rotation of one vector about another vector in space, which means it can describe the rotation condition of the carrier coordinate system with respect to the semi-stable system.

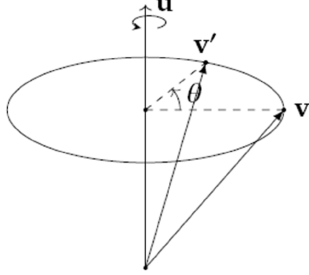


Fig. 1. Description of Quaternion

2.2 Quaternion Differential and Renewal

It is known that unit quaternion is:

$$Q = \cos(\theta/2) + \sin(\theta/2)(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}), \quad (7)$$

And then its derivative of time is:

$$\frac{dQ}{dt} = \Omega_b \cdot Q \quad (8)$$

Wherein,

$$\Omega_b = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Where ω_x , ω_y , ω_z are respectively inertial angular velocities measured by the gyroscope on the aircraft, and respectively correspond to yaw angular velocities, pitch angular velocities, and roll angular velocities measured at zero position. Quaternions are then updated using a first order Runge-Kutta interpolation algorithm. Assume the following differential equation:

$$\frac{dQ}{dt} = f[Q(t), \omega(t)] \quad (10)$$

Assume that $Q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k$, the above formula can be expanded as:

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}_{t+\Delta T} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}_t + \frac{\Delta T}{2} \begin{bmatrix} 0q_0 - \omega_x q_1 - \omega_y q_2 - \omega_z q_3 \\ \omega_x q_0 + 0q_1 + \omega_z q_2 - \omega_y q_3 \\ \omega_y q_0 - \omega_z q_1 + 0q_2 + \omega_x q_3 \\ \omega_z q_0 + \omega_y q_1 - \omega_x q_2 + 0q_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.3 Subdivision Technology for Attitude Angle Prediction of Carrier Aircraft

A quaternion attitude angle subdivision scheme based on Triaxial High Precision Gyroscope as shown in FIG. 2 is designed by integrating subsections 2.1 and 2.2. When the control subsystem receives inertial navigation data, the quaternion is initialized. When the attitude angle data is not received, the quaternion model is updated by the acquisition angular velocity of the gyroscope, and the current real-time attitude angle is output. Since the quaternion is initialized every 50 ms, the accumulated error of the long-time product is not large, and the analyzed accumulated error should be equivalent to the drift error in section 2.4.

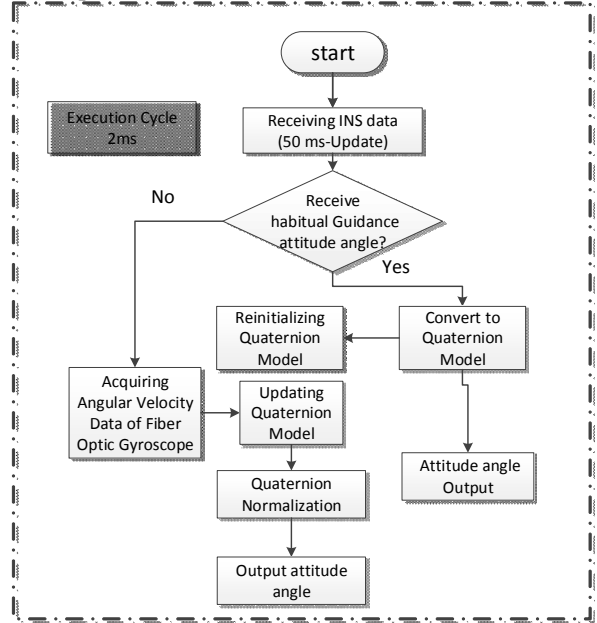


Fig. 2. Attitude Angle Subdivision Principle

2.4 Gyroscope drift estimation

The precision (zero bias stability) of the gyroscope is high. If the inertial angle is obtained by integrating the Triaxial High Precision Gyroscope data directly, the error is very small in a short time. The Triaxial High Precision Gyroscope is placed at rest horizontally, and the gyroscope data of the right east-west axis is collected (the data is not sensitive to the earth rotation angular velocity). The gyroscope drift curve obtained after integration is as shown in FIG. 3. It can be seen from the figure that the integration error of 70 s is about 18°, and the gyroscope drift value calculated by integrating within 5 ms or 10 ms is very small. The drift within 5 ms is about 0.0013 degrees, and the drift error within 10 ms is about 0.0026 degrees. Therefore, the attitude angle data error calculated by integrating the Triaxial High Precision Gyroscope in a short time is small, and the error meets the requirement of semi-stable scanning.

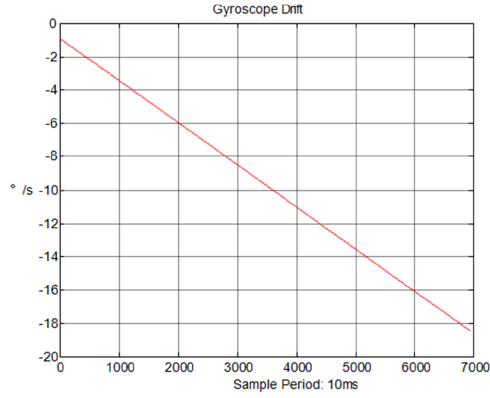


Fig. 3. Integral Angle Error
(Stationary-non-sensitive earth rotation axis)

2.5 Attitude Angle to Quaternion Converting

If the yaw angle is defined as ψ , the pitch angle is defined as θ , and the roll angle is defined as ϕ , then the quaternion is converted by the attitude angle as follows:

$$q = \begin{bmatrix} \cos(\psi/2) \\ 0 \\ 0 \\ \sin(\psi/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) \\ 0 \\ \sin(\theta/2) \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\phi/2) \\ \sin(\phi/2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\phi/2)\cos(\theta/2)\cos(\psi/2) + \sin(\phi/2)\sin(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \sin(\phi/2)\cos(\theta/2)\cos(\psi/2) - \cos(\phi/2)\sin(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \cos(\phi/2)\sin(\theta/2)\cos(\psi/2) + \sin(\phi/2)\cos(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \cos(\phi/2)\cos(\theta/2)\sin(\psi/2) - \sin(\phi/2)\sin(\theta/2)\cos(\psi/2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.6 Quaternion Normalization

The quaternion planning formula is as follows, in order to prevent quaternion degradation; it needs to be normalized after each quaternion update.

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \frac{2(q_0q_1 + q_2q_3)}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)} \\ \arcsin(2(q_0q_2 - q_3q_1)) \\ \arctan \frac{2(q_0q_3 + q_1q_2)}{1 - 2(q_2^2 + q_3^2)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Wherein the yaw angle is ψ , the pitch angle is θ , and the roll angle is ϕ .

3. Simulation verification

One of the difficulties of subdividing attitude angle by quaternion method is how to carry out simulation verification in advance. In order to carry out practical application verification, this paper simulates the velocity of gyroscope by changing attitude angle and attitude angular velocity.

According to the formula (14-15), the simulation is carried out using the conditions of this paper, where the

amplitude is $A=30^\circ$ and the frequency is $f=0.2$.

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A\sin(2\pi ft) \\ A\sin(2\pi ft) \\ A\sin(2\pi ft) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2A\pi f\sin(2\pi ft) \\ 2A\pi f\sin(2\pi ft) \\ 2A\pi f\sin(2\pi ft) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Assuming that the gyroscope is mounted at the non-rotational position of the air detection head, the position of the sub-INS (sub-inertial navigation system), the measured angular velocity of the resulting gyroscope is shown in Fig 7-9.

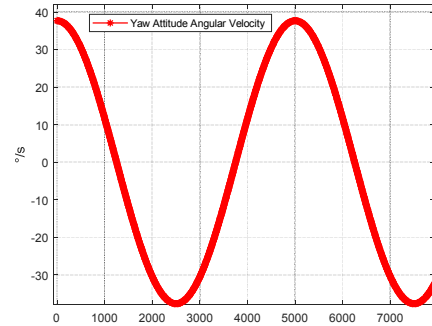


Fig. 4. Carrier yawing angular velocity

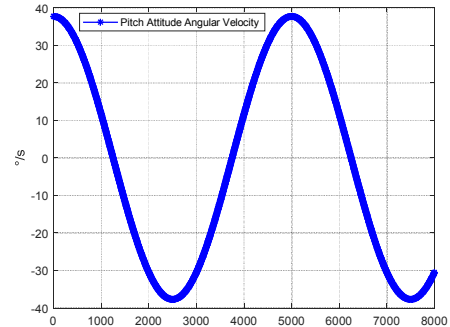


Fig. 5. Carrier pitching angular velocity

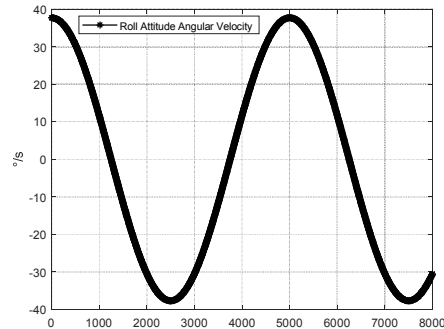


Fig. 6. Carrier rolling angular velocity

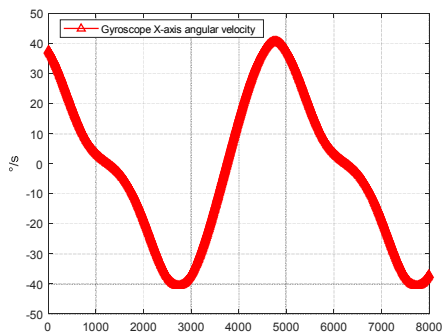


Fig. 7. Carrier yawing angular velocity

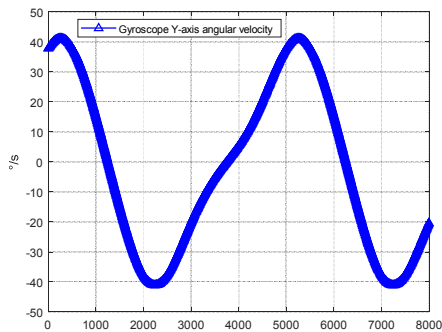


Fig. 8. Carrier pitching angular velocity

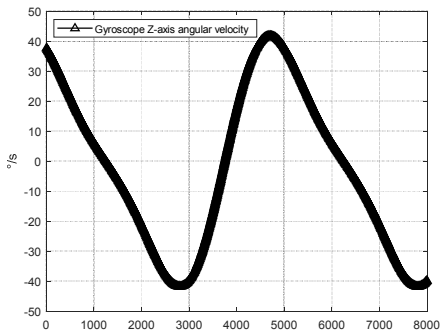


Fig. 9. Carrier rolling angular velocity

The measured angular velocity of the gyro is predicted by (11), and the original attitude angle and the subdivided attitude angle are obtained as shown in Fig 10-12. And the comparison of errors before and after attitude angle subdivision is shown in Fig 13-15, the Attitude angle subdivision error shown in Fig 16-18.

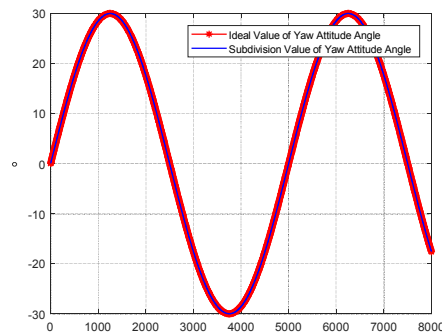


Fig. 10. Comparison of Subdivision Value and Ideal Value of Attitude Angle of Carrier (Yaw)

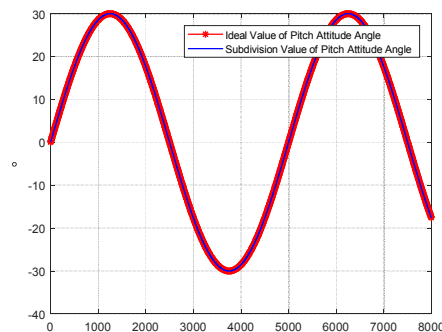


Fig. 11. Comparison of Subdivision Value and Ideal Value of Attitude Angle of Carrier (Pitch)

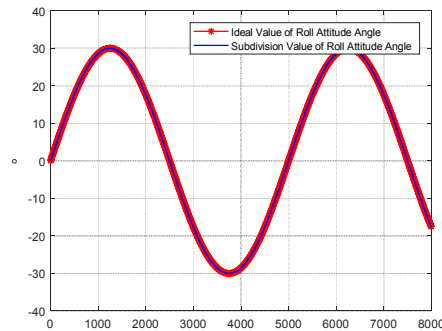


Fig. 12. Comparison of Subdivision Value and Ideal Value of Attitude Angle of Carrier (Roll)

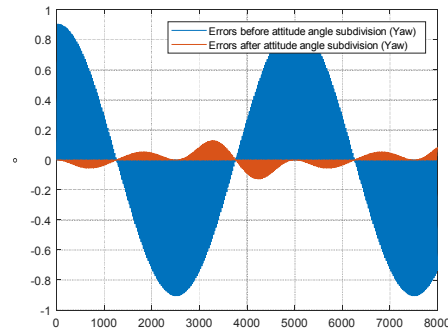


Fig. 13. Comparison of errors before and after attitude angle subdivision (Yaw)

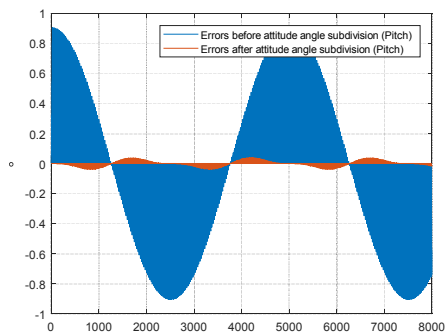


Fig. 14. Comparison of errors before and after attitude angle subdivision (Pitch)

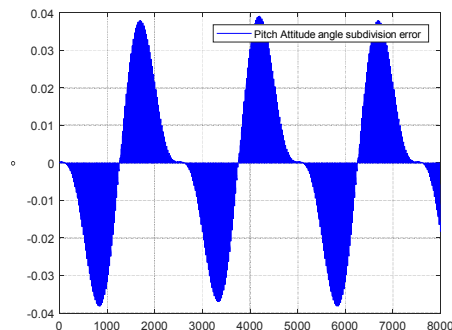


Fig. 17. Attitude angle subdivision error (Pitch)

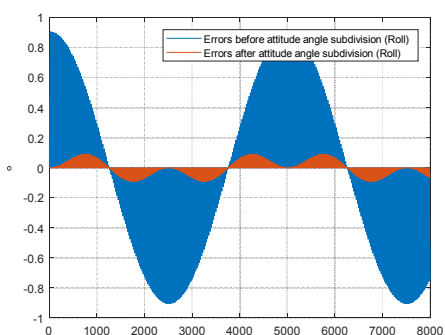


Fig. 15. Comparison of errors before and after attitude angle subdivision (Roll)

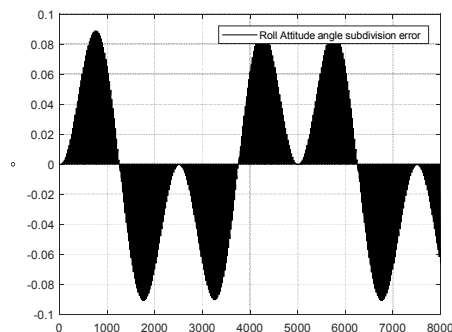


Fig. 18. Attitude angle subdivision error (Roll)

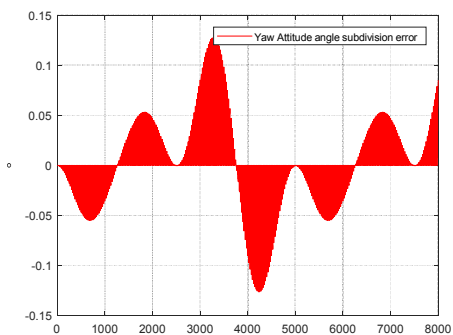


Fig. 16. Attitude angle subdivision error (Yaw)

4. Summary

The inertial guidance attitude angle can be subdivided in time by means of inertial guidance attitude angle plus high precision gyroscope, and the refresh rate of attitude angle can be improved. In this paper, the attitude angle subdivision technology of air-to-air detection head based on three-axis gyro is studied. Simulation results show that the inertial navigation update rate is improved from 100 Hz to 500 Hz by the quaternion attitude subdivision method. After subdivision, the attitude angle error is reduced from 0.9° to 0.12° , 0.03° , 0.08° , the effect of subdivision is very obvious.

References

- 1) Ye. F, Min. Z. F and Jiang. T, Research on Application of Transfer Alignment Technology in Visual Axis Stability Control, Optics & Optoelectronic Technology, Vol.14, No.5, pp.84-88, October 2016
- 2) Feng. L. M, Lu. K. F, Liu. X. D, A Quaternion Method for Attitude Tracking of Micro Spacecraft, Aerospace Control, Vol. 41, No. 1, pp.15-20, Feb. 2022

УДК 681.78

О. А. СТЕПАНОВ, А. М. ИСАЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

В. А. ВАСИЛЬЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

СУБОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ИЗМЕНЧИВОМ ХАРАКТЕРЕ ЕЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПО ДАННЫМ О ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

В рамках байесовского подхода рассматривается задача коррекции показаний навигационной системы (НС) по информации о геофизических полях. Описывается алгоритм ее решения, синтезированный в предположении, что погрешности НС представляют собой сумму квазидетерминированной и случайной составляющих. При этом считается, что уровень второй составляющей за время проведения наблюдения незначительный. Такое допущение позволяет линеаризовать уравнения для измерений относительно второй составляющей и при решении задачи учитывать ее нелинейный характер только относительно составляющей описываемой квазидетерминированной моделью. Рассматривается пример, иллюстрирующий работоспособность и достоинства предложенного алгоритма, направленного на решение задачи коррекции системы счисления по данным о гравитационном поле.

Введение. В последнее время на подвижных объектах различного типа широкое применение получают НС, показания которых корректируются на основе сопоставления измеренных значений некоторого геофизического поля (ГФП) со значениями этого поля, вычисляемыми с использованием заранее снятой карты [1-12]. Такие системы в отечественной литературе нередко также называются системами корреляционно-экстремальной навигации [1, 2, 6, 10]. Системы навигации по ГФП обладают рядом специфических особенностей [3, 12]. Одна из них связана с нелинейным характером решаемой задачи оценивания, что заставляет разработчиков синтезировать различного рода субоптимальные алгоритмы. Другая особенность присуща системам с так называемым точечным зондированием поля, в которых измерительная информация о поле поступает в каждый момент времени в виде его скалярных значений [1, 2, 12]. В этом случае для накопления измерительной информации, обеспечивающей эффективное решение задачи коррекции, требуется пройти определенное расстояние, что необходимо для формирования профиля поля, который может быть однозначно выделен на карте. Отмеченная особенность приводит к достаточно длительному времени проведения коррекции, что в свою очередь порождает необходимость учета изменчивого характера погрешностей НС за время проведения коррекции. В наибольшей степени это проявляется для объектов, передвигающихся с малой скоростью, что характерно, в том числе, для подводных аппаратов. Наибольшее применение при решении задачи коррекции по ГФП получил байесовский подход. В рамках этого подхода учет изменчивости осуществлялся путем использования только квазидетерминированных моделей для описания погрешностей НС или траектории движения, например, в виде линейного тренда [1, 2]. Другой вариант основан на применении различного рода комбинированных схем, в которых изменчивость учитывалась в линейной части алгоритма, на вход которой поступают корректирующие измерения, выработанные в нелинейном блоке [13]. Еще один вариант основан на простейшем учете изменчивости при описании погрешностей в виде винеровской последовательности [14]. В работе [15] с целью снижения влияния изменчивости предложено привлекать информацию о характере траектории объекта при проведении коррекции. В [16] рассматриваются два алгоритма, позволяющие учесть изменчивость погрешностей НС, основанные на последовательных методах Монте-Карло. Один из этих алгоритмов создает предпосылки для вычисления потенциальной точности решения задачи коррекции НС. Для реализации такого алгоритма требуются значительные вычислительные ресурсы и с целью их сокращения предложен субоптимальный алгоритм, в котором ошибки НС представляются в виде суммы

постоянной и изменчивой составляющих. При этом изменчивая составляющая имеет значительно меньшую по уровню величину. К сожалению, такое предположение выполняется не всегда и более адекватным является предположение о том, что погрешность НС может быть представлена в виде суммы квазидетерминированной и изменчивой составляющих. Вопросу построения такого алгоритма и сравнительной его оценке с ранее предложенным алгоритмом согласно методике, описанной в [22], и посвящен предлагаемый доклад.

Постановка задачи и описание сопоставляемых алгоритмов. Следуя [3, 4, 16] предположим, что на борту подвижного объекта имеются НС, вырабатывающая измерения его координат на плоскости $y_i^{NS} = [y_i^{(1)} \quad y_i^{(2)}]^T$ в i -е моменты времени, и датчик, обеспечивающий измерения геофизического поля y_i , которые могут быть представлены в виде:

$$y_i^{NS} = X_i + \Delta y_i^{NS}, \quad (1)$$

$$y_i = \phi^k(X_i) + \Delta y_i^\Sigma, \quad (2)$$

где $X_i = [X_i^{(1)} \quad X_i^{(2)}]^T$ – истинные координаты подвижного объекта в некоторой прямоугольной системе координат; $\Delta y_i^{NS} = [\Delta y_i^{(1)} \quad \Delta y_i^{(2)}]^T$ – погрешности выработки координат места НС; $\phi^k(X_i)$ – функция векторного аргумента, определяющая карту поля и позволяющая с точностью до погрешностей карты Δy_i^k вычислять значения поля в произвольной точке заданного района; $\Delta y_i^\Sigma = \Delta y_i + \Delta y_i^k$ – суммарная погрешность измерений датчика Δy_i и карты поля. Будем полагать, что задача решается в рамках так называемого инвариантного подхода, при котором показания НС трактуются как входной сигнал. В этом случае решение задачи может быть сведено к оцениванию погрешности НС Δy_i^{NS} по измерениям [16]

$$y_i = \phi^k(y_i^{NS} - \Delta y_i^{NS}) + \Delta y_i^\Sigma = s_i(\Delta y_i^{NS}) + \Delta y_i^\Sigma. \quad (3)$$

Для ее решения требуется сформировать составной вектор x_i , включающий x_i^{NS} и x_i^Σ , ввести для них формирующие фильтры, описывающие поведение $\Delta y_i^{NS} = H_i^{NS} x_i^{NS}$ и $\Delta y_i^\Sigma = H_i^\Sigma x_i^\Sigma$, и записать измерения (3) в виде

$$y_i = s_i(H_i^{NS} x_i^{NS}) + H_i^\Sigma x_i^\Sigma. \quad (4)$$

Для получения оптимальной в среднеквадратическом смысле оценки при решении такой нелинейной задачи может быть использован алгоритм, основанный на последовательном методе Монте-Карло [17-21]. При этом при его реализации целесообразно выделить в векторе x_i подвектор x_i^{NS} и воспользоваться процедурой интегрирования по части переменных, позволяющей сократить объем вычислений в методе Монте-Карло. Такой алгоритм, в частности, использован в работе [16]. В этой же работе предложен субоптимальный алгоритм, основанный на представлении погрешностей НС в виде суммы постоянной и изменчивой составляющих. При этом считается, что изменчивая составляющая значительно меньше по уровню и это позволяет использовать линеаризованное представление функции $s_i(\bullet)$ в этой области. Этот алгоритм оказался недостаточно эффективным, поскольку при использовании в качестве НС системы счисления в составе изменчивой составляющей ее погрешности имеется линейно растущая составляющая. В связи с этим в настоящей работе предлагается обобщение описанного приема, заключающее в том, что в составе погрешностей НС выделяются две составляющие

$$\Delta y_i^{NS} = \Delta(t_i) + \delta y_i^{NS} \quad (5)$$

одна из которых представляет собой двумерный квазидетерминированный процесс или последовательность, а другая может быть описана как двумерный случайный процесс или последовательность. При этом полагаем, что для первой составляющей справедливо представление, задаваемое, в виде

$$\Delta(t_i) = \sum_{j=0}^L \theta_j \varphi_j(t_i), \quad (6)$$

где $\theta_j = (\theta_j^{(1)}, \theta_j^{(2)})^T$ – неизвестные двумерные случайные векторы, а $\varphi_j(t_i)$ – известные скалярные функции времени, например это могут быть функции $\varphi_j(t_i) = t^j$, $j = 0, L$, L – величина, определяющая число слагаемых в представлении $\Delta(t_i)$. В этом случае квазидетерминированные составляющие по каждой координате представляют собой полиномиальные функции времени. Считаем, что уровень δy_i^{NS} , таков, что в области априорной неопределенности, сопоставимой по размерам с областью возможных изменений δy_i^{NS} , справедливо линейризованное представление $\phi^k(X_i)$ и таким образом можно записать

$$s_i(\Delta(t_i) + \delta y_i^{NS}) \approx s_i(\Delta(t_i) + \delta y_i^{lin}) + \left. \frac{\partial s_i(\Delta(t_i) + \delta y_i^{NS})}{\partial(\delta y_i^{NS})} \right|_{\delta y_i^{NS} = \delta y_i^{lin}} (\delta y_i^{NS} - \delta y_i^{lin}) \quad (7)$$

В этом случае, принимая, например, $\delta y_i^{lin} = 0$, измерения (3) можно представить в виде

$$y_i = s_i(\Delta(t_i)) + \left. \frac{\partial s_i(\Delta(t_i))}{\partial(\delta y_i^{NS})} \right|_{\delta y_i^{NS} = 0} \delta y_i^{NS} + \Delta y_i^{\Sigma} = s_i\left(\sum_{j=0}^L \theta_j \varphi_j(t_i)\right) + \left. \frac{\partial s_i\left(\sum_{j=0}^L \theta_j \varphi_j(t_i)\right)}{\partial(\delta y_i^{NS})} \right|_{\delta y_i^{NS} = \delta y_i^{lin}} \delta y_i^{NS} + \Delta y_i^{\Sigma}. \quad (8)$$

Сформируем вектор состояния, в состав которого включим подвектор $\theta = (\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)}, \dots, \theta_L^{(1)}, \theta_L^{(2)})^T$ размерности $2(L+1)$ неизвестных коэффициентов и два подвектора, описывающих δy_i^{NS} и Δy_i^{Σ} , как это описано выше. Сделанные предположения позволяют сформулировать решение задачи оценивания составного вектора $\tilde{x}_i = (\theta^T, x_i^T)^T$ по измерениям (8). Особенность этой задачи заключается в том, что при фиксированном значении θ задача относительно остальных компонент вектора состояния будет линейной и для ее решения может быть использован либо метод Монте-Карло, либо метод точечных масс [13, 14].

Выделение в погрешности НС двух составляющих в виде суммы (5) может быть, в частности, основано на представлении общего решения линейного стационарного дифференциального уравнения для формирующего, фильтра, описывающего погрешности НС с использованием фундаментальной матрицы, в виде двух слагаемых, порожденных начальными условиями и входными воздействиями. В докладе изложенная выше идея построения субоптимального алгоритма реализована $\varphi_j(t_i) = t^j$, $j = 0, L$, $L = 1$, т.е. применительно к задаче коррекции показаний НС, представляющей собой систему счисления. При этом считается, что ее ошибки по каждой координате описываются в виде суммы линейного тренда и второго интеграла от белого шума

$$\delta y^{NS(l)}(t) = \theta_0^{(l)} + \theta_1^{(l)} t + q^{(l)} \int_0^t \int_0^{t'} w^{(l)}(\tau) d\tau dt', \quad (9)$$

где $\theta_0^{(l)} = \delta y_0^{NS(l)}$, $\theta_1^{(l)} = \delta V_0^{NS(l)}$, $l = 1, 2$, считаются независимыми между собой центрированными гауссовскими случайными величинами с дисперсиями $\sigma_{y_0}^2$, $\sigma_{V_0}^2$.

Иными словами считается, что квазидетерминированная составляющая описывается линейным трендом, а δy_i^{NS} представляет собой второй интеграл от белого шума.

Нетрудно заметить, что для $L = 0$ предложенный алгоритм будет совпадать с алгоритмом 2, рассмотренным в [16].

В докладе проводится сопоставление по точности состоятельности и вычислительной сложности трех алгоритмов. Два из них совпадают с алгоритмами из работы [16]: **алгоритм 1** (*alg 1*) и **алгоритм 2** (*alg 2*). Иными словами *alg 1* направлен на получение оптимальной оценки и вычисление потенциальной точности, а в *alg 2* подвектор θ размерности 2 включает только начальное значение погрешности НС $\delta y_0^{HC(l)}$, $l=1,2$. В **алгоритме 3** *alg 3* подвектор θ размерности 4 включает $\delta y_0^{HC(l)}$, $\delta V_0^{HC(l)}$, $l = 1, 2$. Сопоставление проводится в соответствии с методикой, описанной в [22]. При этом с использованием коэффициентов $\xi_{X^{(l)},i}^{sub}, \zeta_{X^{(l)},i}^{sub}, l = 1, 2$, характеризующих точность и состоятельность сопоставляемых алгоритмов при оценивании $X_i^{(1)}$ и $X_i^{(2)}$ покомпонентно, рассчитываются приведённые ниже коэффициенты, также характеризующие точность и состоятельность, однако при оценивании двух координат подвижного объекта [22]:

$$\xi_i^{sub} = \sqrt{\left(\xi_{X^{(1)},i}^{sub}\right)^2 + \left(\xi_{X^{(2)},i}^{sub}\right)^2}, \quad \zeta_i^{sub} = \sqrt{\left(\zeta_{X^{(1)},i}^{sub}\right)^2 + \left(\zeta_{X^{(2)},i}^{sub}\right)^2}, \quad sub = alg1, alg2, alg3. \quad (10)$$

Ниже приводятся результаты моделирования, направленные на иллюстрацию достоинств предлагаемого алгоритма.

Результаты моделирования. Моделирование проводилось для задачи коррекции по гравитационному полю, описанной в [15]. Средний модуль градиента поля на моделируемом участке составлял 0.9 мГал/км, а максимальное значение – 2.7 мГал/км. Параметры модели погрешности НС задавались как $\sigma_{y_0} = 1$ км, $\sigma_{V_0} = 0,015$ м/с, $q = 0,004$ м/с², параметры суммарной ошибки карты и измерителя - $\sigma_{\Sigma} = 0,1$ мГал, $\sigma_{\eta} = 0,5$ мГал, $\alpha_{\eta} = 1/120$ с⁻¹. При моделировании для вычисления коэффициентов точности ξ_k^{sub} и состоятельности ζ_k^{sub} использовались действительная и расчётная матрицы ковариаций погрешностей оценивания координат $X_i^{(1)}, X_i^{(2)}$, осреднённые по 500 реализациям. Заметим, что алгоритм 1 основан на последовательном методе Монте-Карло, а алгоритмы 2 и 3 – на методе точечных масс, называемом также методом сеток [13, 14]. Алгоритм 1 был реализован в двух вариантах: с количеством частиц $N = 10^3$ и $N = 10^4$. За базовый алгоритм, относительно которого происходило сопоставление по точности и вычислительной сложности, был выбран *alg 1* при $N = 10^4$. Алгоритмы же 2 и 3 моделировались с числом узлов $N = 10^3$.

На рис. 1 представлены графики коэффициентов $\xi_i^{sub}, \zeta_i^{sub}$. Красный цвет соответствует *alg 1* при $N = 10^4$, а фиолетовый, чёрный и синий – *alg 1, alg 2* и *alg 3* при $N = 10^3$ соответственно.

Лучший среди сопоставляемых алгоритмов с точки зрения точности, как и ожидалось, оказался *alg 1* при $N = 10^4$. При этом *alg 3* уступает ему в точности на величину, не превышающую 10% на всём протяжении коррекции, тогда как на момент окончания обсервации *alg 2* и *alg 1* при $N = 10^3$ проигрывают на $\approx 40\%$ и $\approx 50\%$ соответственно.

На момент окончания обсервации уровень выполнения свойств состоятельности для всех алгоритмов кроме *alg 1* при $N = 10^3$ сопоставим и составляет $\approx 15\%$.

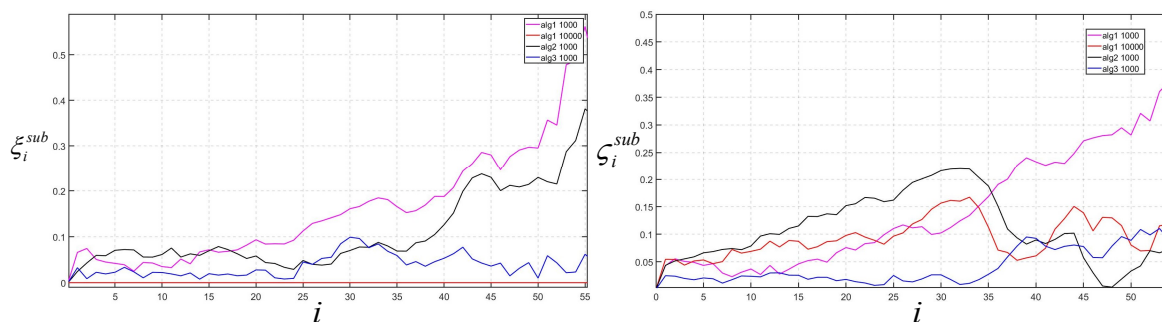


Рис. 1. Коэффициенты точности и состоятельности.

Результаты расчёта коэффициентов, характеризующих вычислительную сложность сопоставляемых алгоритмов приведены в таблице 1. При определении этих коэффициентов использовался процессор QuadCore Intel Core i5-4690K с номинальной тактовой частотой 3,8 ГГц.

Таблица 1.

	Алгоритм 1		Алгоритм 2	Алгоритм 3
T^{sub}	$N = 10^3$	$N = 10^4$	$N = 10^3$	$N = 10^3$
	-0.84	-	-0.81	-0.81

Сопоставляя приведённые в таблице коэффициенты, можно заметить, что алгоритмы 1, 2 и 3 при $N = 10^3$ на $\approx 80\%$ проще в вычислительном плане, чем алгоритм 1 при $N = 10^4$. Таким образом их вычислительная сложность составляет $\approx 20\%$ от вычислительной сложности *alg 1* или, что то же самое, *alg 1*, *alg 2*, и *alg 3* при $N = 10^3$ в пять раз проще, чем *alg 1* при $N = 10^4$.

Заключение. Предложен алгоритм решения задачи коррекции показаний НС по данным о геофизических полях, позволяющий учесть наличие квазидетерминированной и случайной составляющих в составе изменчивых погрешностей НС. При этом считается, что уровень второй составляющей за время проведения обсервации незначительный. Такое допущение позволяет линеаризовать относительно неё уравнения для измерений и при решении задачи учитывать ее нелинейный характер только относительно квазидетерминированной составляющей.

Работоспособность предложенного алгоритма была проиллюстрирована на примере решения задачи коррекции показаний навигационной системы счисления пути по гравитационному полю.

Путем предсказательного моделирования проведено сопоставление алгоритма, учитывающего наличие постоянной и изменчивой составляющих погрешности НС и использующего процедуру линеаризации, с алгоритмом, направленным на получение оптимальной оценки, с позиций точности, состоятельности и вычислительной сложности.

Предварительный анализ показал, что с использованием предложенного алгоритма можно добиться точности и состоятельности, аналогичной алгоритму, направленному на получение оптимальной оценки, при снижении вычислительной сложности примерно в пять раз.

В дальнейшем предполагается более подробное исследование достоинства алгоритма, включающее варьирование исходных данных в широких пределах и образцов используемых полей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00626, <https://rscf.ru/project/23-19-00626/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П. Теория корреляционно – экстремальных навигационных систем. М.: Наука, 1979. 380 с
2. Белоглазов И.Н., Казарин С.Н., Косьянчук В.В. Обработка информации в иконических системах навигации, наведения и дистанционного зондирования местности. ФИЗМАТЛИТ, 2012.
3. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 1. Обзор алгоритмов // Гироскопия и навигация. 2015. №3 (90). С. 102–125. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.3.102-125.

4. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / Под. общей редакцией В.Г. Пешехонова, редактор О.А. Степанов. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 p.
5. **J. Melo, A. Matos** Survey on advances on terrain based navigation for autonomous underwater vehicles, *Ocean Engineering*, Jul. 2017, vol. 139, pp. 250–264, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.04.047>.
6. **Г.И. Джанджгава, Л.И. Августов** Навигация по геополям. Москва: Научтехлитиздат, 2018. 296 с.
7. **О.А. Степанов, А.С. Носов** Алгоритм коррекции навигационной системы по данным карты и измерителя, не требующий предварительного оценивания значений поля вдоль пройденной траектории // *Гироскопия и навигация*. 2020. Т. 28. №2 (109). С. 70–90. DOI 10.17285/0869-7035.0029.
8. **J. Quintas, J. Cruz, A. Pascoal, F.C. Teixeira**, A Comparison of Nonlinear Filters for Underwater Geomagnetic Navigation, *Proceedings of the IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV)*, St. Johns, NL, Canada, 30 September–2 Oct. 2020.
9. **Каршаков Е.В., Павлов Б.В., Тхоренко М.Ю. Папуша И.А.** Перспективные системы навигации летательных аппаратов с использованием измерений потенциальных физических полей // *Гироскопия и навигация*. 2021. Т. 29. №1 (112). С. 32–51. DOI 10.17285/0869-7035.0055.
10. **Ююкин И.В.** Корреляционно-экстремальная навигация по геофизическим полям на основе использования сплайновой технологии // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2021. Т. 13. №4. С. 505–517. DOI:10.21821/2309-5180-2021-13-4-505-517.
11. **Дунаевская К.В., Киселев Л.В., Костоусов В.Б.** Исследование метода вычисления текущей характеристики точности в задаче навигации по картам геофизических полей // *Гироскопия и навигация*. 2021. Т. 29. №1 (112). С. 52–69. DOI: 10.17285/0869-7035.0056.
12. **Степанов О.А., Носов А.С., Торопов А.Б.** О классификации алгоритмов решения задачи навигации по геофизическим полям // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. 2020. С. 326–336.
13. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации // СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор". 2003. 370 с.
14. **Торопов А.Б., Степанов О.А.** Использование последовательных методов Монте-Карло в задаче корреляционно-экстремальной навигации // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2010. №53(10). С. 49–54.
15. **Степанов О.А., Васильев В.А., Литвиненко Ю. А., Исаев А.М.** Учет априорной информации о траектории движения объекта при коррекции показаний навигационной системы по данным о геофизических полях. В сборнике: Юбилейная XXX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. Санкт-Петербург, 2023. – в печати
16. **Степанов О.А., Васильев В.А., Торопов А.Б.** Решение задачи навигации по геофизическим полям с учетом изменчивости погрешностей корректируемой навигационной системы в сборнике: XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. сборник материалов. Санкт-Петербург, 2022. С. 60-65
17. **Соболь И.М.** Численные методы Монте-Карло. М.: «Наука», 1973. 312 с.
18. **Gustafsson, F. et al.** Particle filters for positioning, navigation, and tracking, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Feb. 2002, vol. 50, no. 2, p. 425–437, doi: 10.1109/78.978396.
19. **Chen, Z.** Bayesian Filtering: From Kalman Filters to Particle Filters, and Beyond, *Statistics: A Journal of Theoretical and Applied Statistics*, 2003, vol. 182, no.1, pp. 1–69.
20. **Schön, T., Gustaffson, F., Nordlund, P.-J.** Marginalized Particle Filters for Linear/Nonlinear State-space Models, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005 vol. 53, no. 7, pp. 2279–2289.
21. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Применение последовательных методов Монте-Карло с использованием процедур аналитического интегрирования при обработке навигационной информации // *Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления*. М.: Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, 2014. С 3324–3337.
22. **Степанов О.А. Исаев А.М.** Сравнительный анализ эффективности алгоритмов оценивания в задачах обработки навигационной информации на основе предсказательного моделирования. Материалы конференции Робототехника и мехатроника (РиМ-2023) 16-я Российская мультikonференция по проблемам управления. 2023. – в печати.

O.A. Stepanov, A.M. Isaev (Concern CSRI Elektropribor, ITMO University, St. Petersburg, Russia), V.A. Vasiliev (Concern CSRI Elektropribor, ITMO University, St. Petersburg Electrotechnical University LETI, St. Petersburg, Russia). **Suboptimal Map Aiding Algorithm For A Navigation System With Varying Errors.**

Abstract. The problem of map aiding of navigation system (NS) data is considered within the Bayesian approach. The problem solution algorithm is described, which supposes that NS errors present a sum of quasideterministic and random components. The second component is assumed insignificant during the observation. This assumption allows linearizing the measurement equations for the second component and taking into account the problem nonlinearity only with respect to the component described with the quasideterministic model. The presented example illustrates the performance of the proposed algorithm for the dead-reckoning system aiding with the gravity field data.

И. Б. ФУРТАТ

(Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург)

СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВОЙСТВ ПЛОТНОСТНЫХ СИСТЕМ

В докладе рассматривается класс систем, названных плотностными, для которых производная от квадратичной функции зависит от некоторой функции, названной функцией плотности пространства. С помощью функции плотности задаются свойства пространства, которые оказывают влияние на поведение исследуемых систем. Показана роль плотностных систем в синтезе законов управления. Рассмотрено построение систем управления для объектов с известными и неизвестными параметрами. Все полученные результаты сопровождаются моделированием, иллюстрирующим теоретические выводы.

Введение. В работе рассмотрен класс динамических систем в нормальной форме, правая часть которых зависит от некоторой функции, задающей свойства пространства и влияющей на поведение системы. Такую функцию будем называть функцией плотности пространства (ФП). Если производная от некоторой положительно-определенной квадратичной функции вдоль траекторий системы будет зависеть от ФП, то такие системы будем называть плотностными.

Частный класс таких систем рассматривался в работах [1-8]. В [1] впервые для изучения (не)устойчивости системы

$$\dot{x} = f(x)$$

на плоскости рассматривалась новая система

$$\dot{x} = \rho(x)f(x)$$

со вспомогательной функцией $\rho(x) > 0$ для всех x , где x – вектор состояния. Затем вопрос (не)устойчивости таких систем изучался с использованием свойств дивергенции и потока вектора фазовой скорости в [2-8]. В [3] функция $\rho(x)$ названа ФП (от англ. “density function”), а в [5-8] показана связь полученных результатов с уравнением непрерывности, которое встречается в электромагнетизме, теории волн, гидродинамике, механике деформируемого твердого тела и квантовой механике.

В [9-13] предложен ряд методов управления, гарантирующих нахождения регулируемых сигналов в заданных разработчиком множествах. Для выполнения указанной цели с помощью соответствующего закона управления вводилась вспомогательная функция, от вида которой выполнялись соответствующие свойства в замкнутой системе. Так в [9,10] предложен закон управления с эффектом воронки (от англ. “funnel control”), а в [11] – закон управления с заданным качеством регулирования (от англ. “prescribed performance control”), которые гарантируют нахождение переходных процессов в сходящейся к окрестности нуля трубке. В [12, 13] предложен метод, обобщающий результаты [9-11] и позволяющий гарантировать нахождение выходных переменных в заданной разработчиком трубке, которая может быть несимметрична относительно положения равновесия и не сходится к заданной константе.

Основной результат. В работе будет рассмотрен класс систем, которые явно или неявно зависят от ФП. С помощью этой функции будет задаваться плотность пространства в смысле выделения областей (не)устойчивости, запретных областей (где отсутствуют решения системы) и величины значения ФП, влияющей на поведение исследуемой системы. В отличие:

- 1) от [1-8] будут рассмотрены системы, где ФП не обязательно умножается на всю ее правую часть;
- 2) от [9-13] ФП может присутствовать неявно в правой части системы;
- 3) от [9-13] ФП может гарантировать нахождение решений системы в неограниченном множестве с запретными областями и границы этих множеств могут быть кусочно-непрерывными по времени.

Заключение. В докладе рассмотрен класс динамических систем, названных плотностными, которые содержат в правой части функцию плотности, задающей свойства пространства. Определяя свойства этой функции, можно влиять на поведение исследуемой системы. Полученный вывод в дальнейшем используется для синтеза законов управления. Показано, что при различных заданиях ФП можно получать как классические законы управления, так и новые, позволяющие формировать новые целевые требования к системе. В частности, приведен пример построения адаптивного закона управления с гарантией переходных процессов в заданной разработчиком множестве, в то время как классические адаптивное управление обеспечивает только предельную ограниченность траекторий. При этом параметры множества задаются с помощью ФП, которая задает плотность рассматриваемого пространства. Результаты моделирования подтвердили теоретические выводы.

В докладе, в качестве примера применения ФП с известными схемами управления показано, как существующие алгоритмы управления могут быть модифицированы для получения нового качества переходных процессов.

В дальнейшем свойства плотностных систем можно применять и для более сложных алгоритмов управления таких, как управление по выходу с любой относительной степенью объекта, управление с использованием наблюдателей, управление на скользящих режимах и т.д.

Работы по анализу плотностных систем выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-573). Работы по разработке закона управления с использованием свойств плотностных систем выполнены при поддержке госзадания № 121112500298-6 (ЕГИСУ НИОКТР).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красносельский М.А., Перов А.И., Поволоцкий А.И., Забрейко П.П.** Векторные поля на плоскости. М: Физматлит, 1963.
2. **Жуков В.П.** Необходимые и достаточные условия неустойчивости нелинейных автономных динамических систем // Автоматика и телемеханика. 1990. № 12. С. 59–65.
3. **Жуков В.П.** Дивергентные условия асимптотической устойчивости нелинейных динамических систем второго порядка // Автоматика и телемеханика. 1999. № 7. С. 34-43.
4. **Rantzer A.** A dual to Lyapunov's stability theorem // Systems & Control Letters. 2001. V. 42. P. 161–168.
5. **Furtat I.B.** Divergent stability conditions of dynamic systems // Automation and Remote Control. 2020. V. 81. N. 2. P. 247-257.
6. **Furtat I.B., Gushchin P.A.** Stability study and control of nonautonomous dynamical systems based on divergence conditions // Journal of the Franklin Institute. 2020. V. 357. N. 18. P. 13753-13765.
7. **Furtat I.B., Gushchin P.A.** Stability/instability study and control of autonomous dynamical systems: Divergence method // IEEE Access. 2021. N. 9. P. 49088-49094.
8. **Furtat I.B., Gushchin P.A.** Divergence Method for Exponential Stability Study of Autonomous Dynamical Systems // IEEE Access. 2022. N. 10. P. 49088-49094.
9. **Bechlioulis C, Rovithakis G.** A low-complexity global approximation-free control scheme with prescribed performance for unknown pure feedback systems // Automatica. 2014. V. 50. N. 4. P. 1217-1226.
10. **Liberzon D, Trenn S.** The bang-bang funnel controller for uncertain nonlinear systems with arbitrary relative degree // IEEE Transaction on Automatic Control. 2013. V. 58. N. 12. P. 3126-3141.
11. **Berger T, Le H, Reis T.** Funnel control for nonlinear systems with known strict relative degree // Automatica. 2018. V. 87. P. 345-357.
12. **Furtat I.B., Gushchin P.A.** Control of Dynamical Plants with a Guarantee for the Controlled Signal to Stay in a Given Set // Automation and Remote Control. 2021. V.82. N. 4. P. 654-669.
13. **Furtat I.B., Gushchin P.A.** Nonlinear feedback control providing plant output in given set // International Journal of Control. 2021. <https://doi.org/10.1080/00207179.2020.1861336>.

I.B. Furtat (Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg). **Design of the Control Laws based on Properties of the Density Systems**

The report considers a class of systems, called density, for which the derivative of a quadratic function depends on some function, called the density function. The density function is used to set the properties of space that affect the behavior of the systems under study. The role of density systems in the design of control laws is shown. The construction of control systems for objects with known and unknown parameters is considered. All the obtained results are accompanied by simulations illustrating the theoretical conclusions.

А. С. ГУБАНКОВ, И. В. ГОРНОСТАЕВ
(Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН,
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток,
Севастопольский государственный университет, Севастополь)

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ КИНЕМАТИЧЕСКИ ИЗБЫТОЧНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Работа посвящена решению задач расширения возможной области применения манипуляционных роботов (МР) и исключения аварийных ситуаций, возникающих при управлении этими роботами в условиях неопределенности окружающей среды (на производстве или при выполнении подводных работ). Для этого предлагается использовать избыточные степени подвижности, позволяющие перемещать МР вблизи объектов работ.

Введение. В настоящее время пока не удается полностью автоматизировать выполнение манипуляционных операций из-за того, что при работе МР в условиях неопределенности окружающей среды, когда траектории движения их рабочих инструментов (РИ) не могут быть заранее просчитаны (особенно это актуально при обслуживании объектов подводной инфраструктуры с использованием необитаемых подводных аппаратов), возможен вход МР в ряд конфигураций, в которых плавность и точность их движений нарушается. К этим конфигурациям относятся те, в которых:

- 1) хотя бы одна из степеней подвижности МР входит в ограничения;
- 2) решение обратной задачи кинематики (ОЗК) МР неоднозначно [1];
- 3) РИ достигают границ рабочих областей МР.

При входе МР в любую из перечисленных конфигураций РИ должен быть остановлен, иначе возможно возникновение аварийной ситуации.

Для исключения этих конфигураций может быть применен способ [2], предполагающий использование избыточных степеней подвижности, перемещающих МР вблизи объекта работ при подходе к указанным положениям. Но применение этих избыточных степеней требует использования специальных методов решения ОЗК (см. обзорные статьи [3–5]), позволяющих формировать программные сигналы для всех степеней подвижности МР.

Основные подходы к решению ОЗК для кинематически избыточных МР предполагают применение методов аналитических [6], численных [7, 8], комбинированных численно-аналитических [9], а также методов машинного обучения, включающих применение нейронных сетей [10, 11], нечеткой логики [12] и генетических алгоритмов [13]. Однако применение указанных методов затрудняется их недостатками (высокой вычислительной сложностью, наличием дополнительных ограничений на кинематические схемы МР и др.), из-за чего разработка для таких манипуляторов универсального метода решения ОЗК, обладающего низкой вычислительной сложностью, остается актуальной задачей.

Таким образом, представленный доклад посвящен решению следующей **задачи**: разработать метод автоматического формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР с целью обеспечения их точной и безаварийной работы в условиях заведомой неопределенности окружающей среды за счет перемещения основания МР вблизи объекта работ при приближении к заданным нежелательным конфигурациям.

Описание общего подхода к решению поставленной задачи. Для решения поставленной задачи и уменьшения вычислительной сложности предлагается использовать следующий подход – декомпозицию решения ОЗК. При этом отдельно решается ОЗК для основных степеней подвижности МР (без избыточности) и для остальных избыточных степеней, обеспечивающих перемещение всего МР вблизи объекта работ. Ранее такой подход был использован в методе [14] для управления шестистепенным МР с одной избыточной степенью подвижности. В настоящей же работе предлагается развить этот метод для МР, способных перемещаться более чем по одной избыточной степени подвижности.

При этом для основных степеней подвижности МР ОЗК решается известными аналитическими методами [1, 14], которые возможно реализовывать даже на маломощных бортовых компьютерах. А для управления избыточными степенями подвижности предлагается использовать специальные индикаторные функции [14], значения которых тем больше, чем ближе МР к своим нежелательным конфигурациям. С использованием этих индикаторных функций предлагается рассчитывать градиент, указывающий направление смещения основания МР, при движении по которому значение наибольшего из индикаторов будет уменьшаться наиболее быстро, исключая вход МР в нежелательные положения и возникновение аварийных ситуаций.

На основе описанного подхода разработан метод и синтезирована система, позволяющая обеспечивать плавное и точное движение РИ кинематически избыточных МР по пространственным траекториям.

Результаты моделирования. Работоспособность этого метода подтверждается результатами численного моделирования в среде Matlab. При этом траектория движения РИ МР задавалась так, чтобы при неподвижном основании робота (см. рис. 1а) отдельные степени подвижности входили в ограничения, а МР входил в особые положения, при этом обрабатывая нежелательные реверсы в отдельных степенях подвижности, из-за чего РИ отклонялся от траектории на недопустимые 0,1-0,8 м, а движение МР аварийно прерывалось, когда его РИ достигал границы рабочей области. При использовании же синтезированной системы (см. рис. 1б) все указанные проблемы полностью исключались за счет перемещений основания МР, что позволило сохранить высокую точность движений РИ, а отклонение не превышало 1,5 мм.

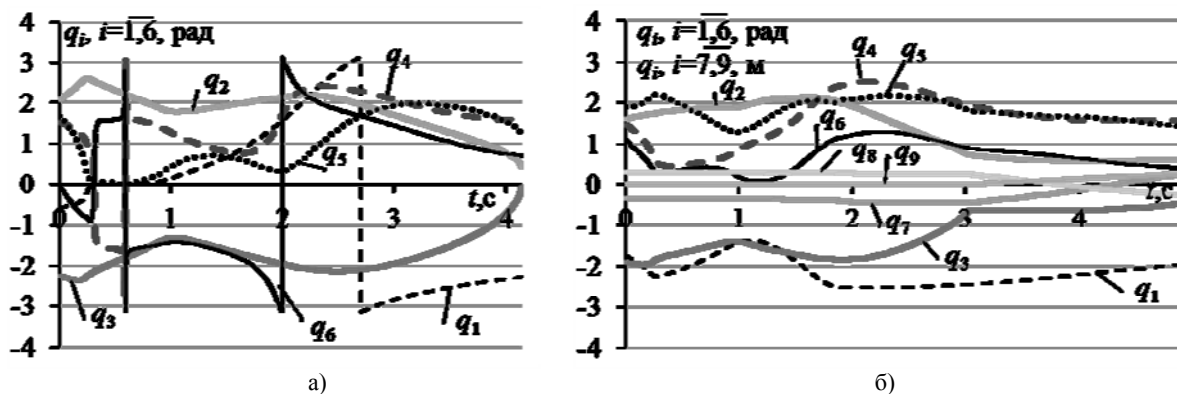


Рис. 1. Законы изменения программных значений q_i при а) неподвижном ($q_7-q_9 = 0$); б) подвижном ($q_7-q_9 = \text{var}$) основании МР

Заключение. В данной работе представлены предварительные результаты разработки метода автоматического формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР, работающих в условиях неопределенности окружающей среды. В последующих работах представленные результаты будут дополнены и формализованы, а также будут определены границы применимости этого метода с учетом ограниченной скорости движения основания МР.

Работа проводилась при поддержке Российского научного фонда (грант 22-19-00392)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Craig J.** Introduction to robotics: Mechanics and Control; Pearson Education International: New Jersey, NJ, USA, 2005. 408 p.
2. **Филаретов В.Ф., Горностаев И.В.** Патент РФ № 2785144. Способ управления многостепенным манипулятором. Бюл. № 34, 2022.
3. **Дема Н.Ю., Колюбин С.А., Овчаров А.О.** Исследование методов решения обратной задачи кинематики для манипуляторов избыточной кинематики. Материалы XLVII научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО, 2018. Т. 1. С. 211–213.
4. **Yahya S., Moghavvemi M., Mohamed H. A. F.** Redundant manipulators kinematics inversion, Scientific Research and Essays, 2011. Issue 26. Vol. 6. pp. 5462–5470.
5. **Ростов Н.В.** Анализ алгоритмов решения обратных задач кинематики в системах управления движением роботов. Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2014. Т. 205. № 5. С. 93–99.

6. **Gong M., Li X., Zhang L.** Analytical inverse kinematics and self-motion application for 7-DOF redundant manipulator. IEEE Access 2019, 7, pp. 18662–18674.
7. **Wang X., Cao J., Liu X., Chen L., Hu H.** An enhanced step-size Gaussian damped least squares method based on machine learning for inverse kinematics of redundant robots. IEEE Access 2020, 8, pp. 68057–68067.
8. **Hung D.M., Linh D.T., Ba D.X.** An Intelligent Control Method for Redundant Robotic Manipulators with Output Constraints. Int. Conf. on System Science and Engineering, 2021. pp. 116–121.
9. **Олейник М.А., Хаймович А.И., Балякин А.В., Щедрин Е.Ю.** Математическая модель кинематики промышленного робота, оснащенного двухосевым позиционером. Вестник УГАТУ, 2021. Т. 25. № 1. С. 77–84.
10. **Almusawi A.R.J., Dulger L.C., Карусу S.** A new artificial neural network approach in solving inverse kinematics of robotic arm (denso vp6242). Computational intelligence and neuroscience, 2016. Vol. 2016. pp. 1–10.
11. **Koker R.** A neuro-simulated annealing approach to the inverse kinematics solution of redundant robotic manipulators. Engin. Comp. 2013. 29. pp. 507–515.
12. **Crenganis M., Bologa O.** Efficient method for redundancy resolution of a 7 DoF manipulator. Supliment 1 Buletinul AGIR, 2015. pp. 222–229.
13. **Koker R.** A genetic algorithm approach to a neural-network-based inverse kinematics solution of robotic manipulators based on error minimization. Inf. Sci. 2012. 222. pp. 528–543.
14. **Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В.** Разработка метода формирования программных сигналов для исполнительных электроприводов манипуляторов с избыточными степенями подвижности. Часть I. Мехатроника, автоматизация, управление, 2022. Т. 23. № 1. С. 23–30.

A.S.Gubankov, I.V.Gornostaev (Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Admiral G.I. Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok, Sevastopol State University, Sevastopol) **Method of forming reference signals for kinematically redundant manipulators**

Abstract. The report is devoted to solving the problems of expanding the possible scope of manipulation robots and eliminating emergency situations that occur when controlling these robots in conditions of environmental uncertainty (in industrial production or when performing underwater work). To do this, it is proposed to use redundant degrees of freedom, allowing to move the manipulation robots near the objects of work.

Э. Ш. МУРСАЛИМОВ

(Институт проблем морских технологий им. М.Д. Агеева ДВО РАН, г. Владивосток)

И. М. ГРИГОРЬЕВ

(Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток)

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА МНОГОСТЕПЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В работе предложен метод автоматического формирования траекторий движения рабочих органов манипуляторов при поверхностной обработке различных деталей сложной формы. Этот метод последовательно, начиная от края полигональной модели поверхности обрабатываемой детали, формирует замкнутые траектории движения рабочего органа с учетом ширины его рабочей области до полного покрытия всей поверхности.

Введение. На сегодняшний день существует множество задач, требующих поверхностной обработки различных деталей с помощью многостепенных манипуляторов (ММ): чистовое фрезерование [1], покраска [2], напыление металлов [3], полировка и др. Ручное формирование траекторий движения рабочих органов (РО) ММ для решения этих задач является весьма трудоемким процессом.

В настоящее время уже разработаны алгоритмы, позволяющие решать задачи автоматического построения траекторий для обработки различных поверхностей, которые можно разделить на две группы. В первую группу входят алгоритмы, использующие разбиение обрабатываемых поверхностей деталей на отдельные сегменты, представляющие собой различные примитивы (плоскость, цилиндр, конус и т.д.), для которых заранее задаются способы формирования траекторий [4]. Ко второй группе относятся алгоритмы, которые формируют траектории в форме меандра с заданным шагом и проецируют их на трехмерные полигональные модели поверхностей обрабатываемых деталей [2], что в процессе обработки обеспечивает движение РО по их поверхности. Однако эта группа методов хорошо работает только при обработке плоских поверхностей, в других же случаях расстояния между траекториями на самой поверхности детали будет изменяться из-за их сложной пространственной формы, что не позволит полностью обработать всю деталь.

Кроме того, существующие методы применимы только тогда, когда трехмерная модель обрабатываемой поверхности заранее известна. Однако часто бывает так, что эти трехмерные модели по разным причинам (деформации, неточности литья и т.п.) не соответствуют реальным обрабатываемым деталям. Таким образом, данная работа посвящена разработке нового метода автоматического формирования траекторий движения РО ММ при обработке объектов сложной формы, точная модель которых заранее неизвестна.

Описание метода. Для решения задачи формирования траектории РО ММ сначала необходимо выполнить трехмерное сканирование поверхности обрабатываемой детали, для чего могут использоваться хорошо зарекомендовавшие себя оптические или лазерные сканеры. Полученная модель детали представляет собой трехмерную полигональную сетку, состоящую из массива полигонов $F = \{f_1, \dots, f_n\}$, где $f_i = \{p_1^i, p_2^i, p_3^i, N_i\}$ – каждый треугольный полигон поверхности детали с координатами вершин $p_j^i = [x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}]$, $j = \overline{1,3}$ и нормалью $N_i = [x_{iN}, y_{iN}, z_{iN}]$. Полигональная поверхность детали может состоять как из одной области, так и из нескольких отдельных областей, которые должны быть полностью покрыты сформированными траекториями с заданным шагом h между отдельными линиями траекторий, обусловленным шириной контакта РО с поверхностью обрабатываемой детали.

Следующим этапом метода является поиск края полигональной поверхности. Для этого к каждому полученному ранее полигону формируется список соседних граней. При этом, если количество этих соседних граней меньше трёх, тогда этот полигон является крайним. Эти «крайние» полигоны формируют общий край полигональной поверхности.

После того как край поверхности найден, от него на расстоянии $h/2$ откладывается отдельная замкнутая траектория движения РО ММ (см. рис. 1, синяя линия).

Далее, осуществляется удаление всех полигонов от края на расстоянии h . После чего повторяется предыдущий этап и формируется отдельные траектории движения, как показано на рис. 1 (фиолетовая и красная линии сформированных траекторий).

Таким образом, последовательно осуществляется «отрезание» края полигональной поверхности на заданное расстояние h , пока она вся не будет заполнена траекториями. При этом на каждом шаге в памяти хранится только та часть поверхности, которая еще не была обработана, что существенно снижает вычислительную сложность.

Необходимо отметить, что сформированные траектории не являются гладкими, т.к. на каждом новом цикле от края обрабатываемой полигональной поверхности детали полигоны удаляются целиком, в результате чего край детали имеет «рваную» форму. Поэтому, для сглаживания сформированных траекторий, вдоль которых будет двигаться РО, перемещаемый ММ, был предложен простой алгоритм сглаживания, который проходит по массиву базовых точек траектории и для каждой из них рассчитывает новую координату точки траектории равной среднему значению координат между двумя соседними базовыми точками. В результате удается сгладить траекторию движения РО, как показано на рис. 2.

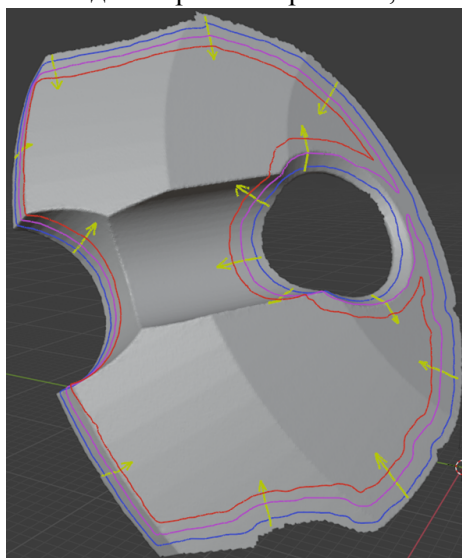


Рис. 1. Схематичный пример работы предлагаемого алгоритма формирования траектории на отдельной области поверхности буровой головки

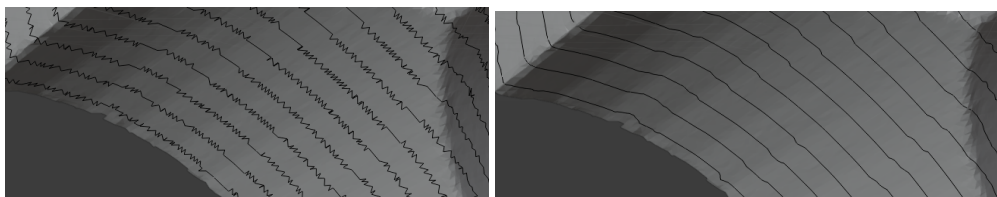


Рис. 2. Сформированная траектория движения РО до и после сглаживания.

Результаты численных экспериментов. Для проверки работоспособности предложенного метода были проведены численные эксперименты. При этом была выполнена реализация предложенного метода в виде экспериментального образца (ЭО) на языке Python и использована трехмерная полигональная модель буровой головки. Результаты работы разработанного ЭО сравнивались с известным алгоритмом, рассмотренным в работе [2]. На рис. 3 визуальным образом представлены сформированные траектории движения РО ММ, а в табл. 1 представлены сравнительные результаты.

Таблица 1

Сравнительные результаты работы алгоритмов

	Заданное расстояние между траекториями, мм	Максимальное расстояние между траекториями, мм	Минимальное расстояние между траекториями, мм	Максимальная относительная ошибка, %
Созданный ЭО	2.5	2.57	2.33	7%
Алгоритм, предложенный в работе [2]	2.5	7.31	2.57	192%

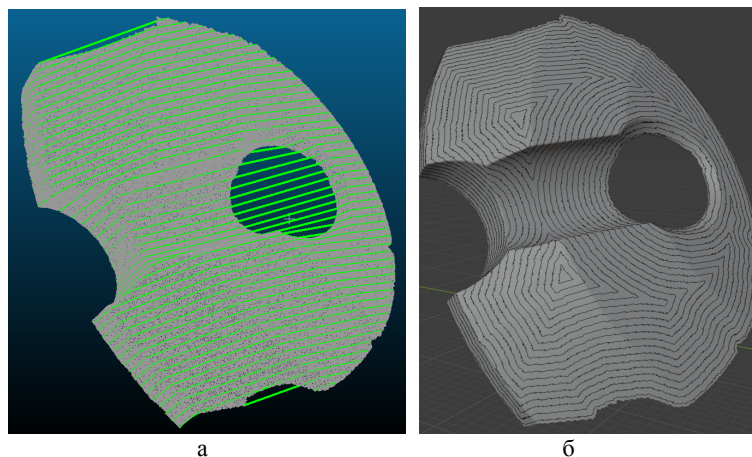


Рис. 3. Сравнение работы двух алгоритмов (а – предложенного в работе [2], б – разработанного на основе предложенного в работе метода)

Заключение. В работе описан новый метод автоматического формирования траекторий для поверхностной обработки деталей сложной формы. Новизна метода состоит в способе формирования траекторий, учитывающих расстояние между ними согласно ширине контакта РО с поверхностью детали. Выполнена проверка работоспособности и эффективности предложенного метода при формировании траекторий для поверхности сложной формы. По сравнению с типовыми алгоритмами, отклонения расстояния между траекториями существенно снижены.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, проект FZNS-2023-0011.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yuwen S., Jinjie J., Jinting X., Mansen C., Jinbo N. Path, feedrate and trajectory planning for free-form surface machining: A state-of-the-art review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022. Vol.35, Iss.8, P. 12-29.
2. Chen H., Sheng W., Xi N., Song M., Chen Y. CAD-based automated robot trajectory planning for spray painting of free-form surfaces. *Industrial Robot*. 2002. Vol. 29. No. 5. P. 426-433.
3. Alontseva D.L., Krasavin A.L., Kadyroldina A.T., Kussaiyn-Murat A.T., Nurekenov D. M., Zhanuzakov Ye.T., Prokhorenkova N.V. Development of the microplasma spraying technology for applying biocompatible coatings. *Proceedings of 12th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (AIS 2017)*. 2017. P.45-48.
4. Liu G., Sun X., Liu Y., Liu T. Li C., Zhang X. RETRACTED ARTICLE: Automatic spraying motion planning of a shotcrete manipulator. *Intelligent Service Robotics*. 2021.

E.S.Mursalimov (M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems FEB RAS), I.M.Grigorev (Far Eastern Federal University, Vladivostok). **Method of Automatic Formation of Movement Trajectories of the Working Tool of Multi-links Manipulators When Processing Objects Of Complex Shape “Navigation and Motion Control”**

Abstract. This abstract proposes a method for the automatic formation of the trajectories of the working tools of manipulators during surface treatment of various parts of complex shape. This method consistently, starting from the edge of the polygonal model of the surface of the workpiece, forms closed trajectories of movement of the working tool, taking into account the width of its working area, until the entire surface is completely covered.

А. А. ТИМОШЕНКО

(Институт проблем морских технологий им. М. Д. Агеева ДВО РАН,
Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток)

В. Ф. ФИЛАРЕТОВ

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,
Севастопольский государственный университет, Севастополь)

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ПОЗИЦИОННО-СИЛОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ НЕОБИТАЕМЫМИ ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ С МНОГОСТЕПЕННЫМ МАНИПУЛЯТОРОМ

В настоящей работе предложен новый подход к построению систем управления для автономных подводных роботов, оснащенных многостепенными манипуляторами, для высокоточного выполнения различных технологических операций над объектами подводной инфраструктуры, в том числе требующих силового воздействия на эти объекты, в полностью автоматическом режиме.

Введение. Для автоматического выполнения силовых технологических операций с помощью автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащаемых многостепенными манипуляторами (ММ), требуется разрабатывать и создавать специальные комплексные системы, реализующие высококачественное позиционно-силовое управление. В настоящее время уже известен способ позиционно-силового управления манипуляционным АНПА [1] в режиме его стабилизации в водной среде над объектом работ (ОР) с использованием системы технического зрения (СТЗ) и гироскопических датчиков. С его помощью предлагается формировать желаемый вектор силы со стороны рабочего инструмента (РИ) ММ на ОР за счет одновременной подачи управляющих воздействий на все приводы ММ. Но это приводит к смещению аппарата от его исходного положения, и вследствие, к потере контакта между РИ ММ и ОР. Кроме того, при управлении ММ описанным способом не учитываются фактические значения присоединенных масс и моментов инерции жидкости к звеньям ММ, что приводит к большим динамическим ошибкам при отработках желаемых траекторий и силовых воздействий РИ на ОР.

Таким образом, в настоящей работе ставится и решается задача разработки нового подхода к построению систем управления для выполнения силовых технологических операций с помощью АНПА с ММ, призванных устранить указанные выше недостатки.

Описание подхода. Для реализации предложенного подхода АНПА должен иметь такое расположение движителей, чтобы оно смогло обеспечивать управление по всем его шести степеням свободы. И ММ должен иметь не менее шести степеней подвижности, чтобы создавать любое направление вектора силового воздействия РИ на ОР в пространстве.

Предложенный подход реализуется в несколько этапов.

На первом этапе для каждого электропривода ММ строится его преобразованная модель, чувствительная к появлению внешнего обобщенного момента, действующего на выходные валы этих электроприводов. Затем на основе этой модели синтезируются наблюдатели с переменной структурой (НПС) [2], которые позволяют точно оценить величины указанного внешнего момента, а также угловых скоростей и ускорений выходных валов электроприводов без использования соответствующих физических датчиков.

На втором этапе определяются величины масс и моментов инерции жидкости, присоединяемых к звеньям ММ при его движении в вязкой среде. Для этого для манипулятора задают движение по произвольной траектории и в процессе этого движения с помощью синтезированных НПС производят указанные ранее оценки. С использованием этих оценок формируют аналитические выражения, описывающие обобщенные внешние моменты, действующие в электропри-

водах ММ при его движении. Неизвестные искомые параметры этих выражений определяются с помощью методов параметрической идентификации.

На третьем этапе осуществляется точная стабилизация АНПА в водном пространстве так, чтобы ОР располагался в рабочей области ММ и области видимости СТЗ АНПА. Затем с помощью СТЗ, отслеживающей взаимное расположение трех маркеров на ОР или на дне, осуществляется привязка АНПА к некоторой исходной точке водного пространства. После стабилизации АНПА с помощью СТЗ формируется 3D-модель ОР, для которой строятся желаемые траектории движения РИ ММ с требуемыми по величине и направлению векторами силового воздействия на ОР.

На четвертом этапе осуществляется перевод РИ ММ из его исходного положения к начальной точке построенных траекторий до контакта с поверхностью ОР, который определяется с помощью типовых тактильных датчиков. Во время этого перевода, непрерывно решая обратную задачу динамики для ММ с учетом ранее идентифицированных значений присоединенных масс и моментов инерции жидкости, определяется силовое и моментное воздействие, которое ММ при его движении в вязкой среде оказывает на АНПА. Это воздействие автоматически компенсируется плавно изменяющимися тягами движителей АНПА, а оставшиеся незначительные смещения АНПА обрабатываются его системой стабилизации.

На пятом этапе с учетом текущей конфигурации ММ определяются желаемые значения внешних моментов во всех сочленениях ММ и желаемые тяги движителей АНПА, которые в совокупности создадут желаемые по величине и направлению силу и момент со стороны РИ на ОР. Затем на входы соответствующих движителей АНПА скоординировано подаются программные сигналы, изменяющиеся плавно и равномерно в заданном временном интервале от нуля до их расчетных величин, которые обеспечивают желаемые значения тяг. Одновременно с этим на входы электроприводов ММ подаются программные сигналы, обеспечивающие равномерное и плавное нарастание внешних моментов на их выходах, которые позволяют сохранить исходную конфигурацию ММ и при этом обеспечивают создание желаемого вектора силового воздействия РИ на ОР.

На шестом этапе после достижения заданной величины исходного желаемого силового воздействия на ОР начинается точное движение РИ ММ по ранее сформированной траектории с оказанием его точного силового воздействия на ОР. Это обеспечивается с помощью комбинированной позиционно-силовой СУ [3], использующей идентифицированные ранее величины присоединенных масс и моментов инерции жидкости. Точное движение РИ ММ по заданным траекториям обеспечивается самонастраивающимися корректирующими устройствами [4], использующих оценки динамических параметров ММ, которые получают с помощью НПС, синтезированных на первом этапе. Одновременно осуществляется компенсация силового воздействия на АНПА со стороны ММ за счет формирования соответствующих тяг движителей, в которых к этому времени уже завершились все переходные процессы.

Заключение. В работе предложен новый подход к построению высококачественных позиционно-силовых систем управления АНПА с ММ, обеспечивающий точное выполнение требуемых силовых технологических операций под водой с сохранением постоянного контакта РИ ММ с поверхностью ОР. Проведенные предварительные испытания отдельных этапов предлагаемого подхода показали его высокую эффективность даже при выполнении сложных технологических операций под водой в полностью автоматическом режиме.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00392

ЛИТЕРАТУРА

1. Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Юрманов А.П., Пятавин П.А. Способ управления подводным манипулятором в режиме зависания подводного аппарата // патент РФ № 2789510, Бюл. № 4 от 06.02.2023
2. Жирабок А.Н., Зуев А.В., Филаретов В.Ф., Шумский А.Е. Идентификация дефектов в нелинейных системах на основе скользящих наблюдателей с ослабленными условиями существования. Известия РАН. Теория и системы управления. 2022. № 3. С. 21-30.
3. Зуев А.В., Филаретов В.Ф. Особенности создания комбинированных позиционно-силовых систем управления манипуляторами. Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. № 1. С. 154-162.

4. **Филаретов В.Ф.** Самонастраивающиеся системы управления приводами манипулятора. Владивосток: ДВГТУ. 2000.

A.A.Timoshenko (M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, Far East Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok; Far Eastern Federal University, Vladivostok), V.F.Filaretov (Sevastopol State University, Sevastopol). **An approach to the construction of high-quality positional power control systems for autonomous underwater vehicles with a multi-link manipulator**

Abstract. In this paper, a new approach is proposed to the construction of control systems for autonomous underwater robots equipped with multi-link manipulators for high-precision execution of various technological operations on underwater infrastructure objects, including those requiring force action on these objects, in fully automatic mode.

Н. А. КРАСАВИН

(Институт проблем морских технологий им. академика М. Д. Агеева ДВО РАН, Владивосток)

МЕТОД ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ С МНОГОЗВЕННЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТАКТНЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ ОПЕРАЦИЙ С ПОДВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

В работе представлен новый метод позиционно-силового управления автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА) с многозвенными манипуляторами (ММ) для выполнения различных контактных манипуляционных операций, в том числе и с оказанием заданного усилия на поверхности объектов работ, в режиме стабилизируемого зависания аппарата над этими объектами.

Введение. В настоящее время АНПА все чаще оснащаются ММ для автономного выполнения манипуляционных операций, связанных со взаимодействием с подводными объектами [1, 2]. При этом большинство таких работ подразумевают силовой контакт рабочего инструмента ММ с поверхностями объектов, в том числе и с оказанием заданного усилия, определяемого требованиями к конкретной технологической операции. Например, очистка поверхностей, отбор проб грунта, обслуживание подводных манифольдов. Такие работы оправдано выполнять в режиме стабилизируемого зависания АНПА над объектами работ [3, 4], поскольку в этом режиме аппарат занимает наиболее удобное положение для выполнения работ, не взмучивая придонные слои. Однако в процессе контакта инструмента ММ с поверхностью объекта работ сила реакции опоры неизбежно приведет к возникновению нежелательных моментов в приводах ММ, а также к силовому и моментному воздействиям на точку крепления ММ к АНПА. Эти воздействия будут отклонять инструмент ММ от траектории движения и приведут к потере силового контакта с поверхностью объекта работ.

В большинстве известных подходов, посвященных решению указанной проблемы, используются многокомпонентные сило-моментные датчики для измерения динамических воздействий на АНПА и ММ [5, 6]. Использование таких датчиков значительно затрудняет практическое использование предложенных методов по ряду причин [7]: они подвержены зашумлению, снижают жесткость кинематической цепи, обладают ограниченной полосой пропускания, высокой стоимостью и подразумевают внесение изменений в конструкцию ММ.

Поэтому предлагаемый доклад посвящен созданию нового метода позиционно-силового управления стабилизируемым в режиме зависания АНПА с установленным 6-степенным ММ, не требующего установки дорогих многокомпонентных датчиков.

Описание работы метода. Для успешного выполнения контактных операций АНПА должен стабилизироваться в режиме зависания [4] вблизи объекта работ с помощью тяг его движителей, обеспечивающих управление его перемещениями по 6 степеням свободы. Такой АНПА, оснащенный ММ и 3 парами движителей, изображен на рисунке 1. ММ с кинематической схемой РУМА с 6 степенями подвижности закреплен под центром водоизмещения аппарата. На этом рисунке введены следующие обозначения: $OXYZ$ – абсолютная система координат (СК); $CX_C Y_C Z_C$ – связанная с АНПА СК; $X_0 Y_0 Z_0$ – СК, связанная с основанием ММ; $X_{1...5} Y_{1...5} Z_{1...5}$ – СК, связанные с началами соответствующих звеньев ММ; $X_G Y_G Z_G$ – СК, связанная инструментом ММ; $P_{1...6}$ – тяги, создаваемые приводами АНПА; h, l, k – геометрические параметры компоновки движителей АНПА; $d_0 \in R^3$ – вектор, определяющий положение основания ММ в СК $CX_C Y_C Z_C$. При выполнении контактных операций неизбежно возникновение вектора силы ${}^G \vec{F}_e \in R^3$, заданного в СК, связанной с инструментом ММ (рис. 1).

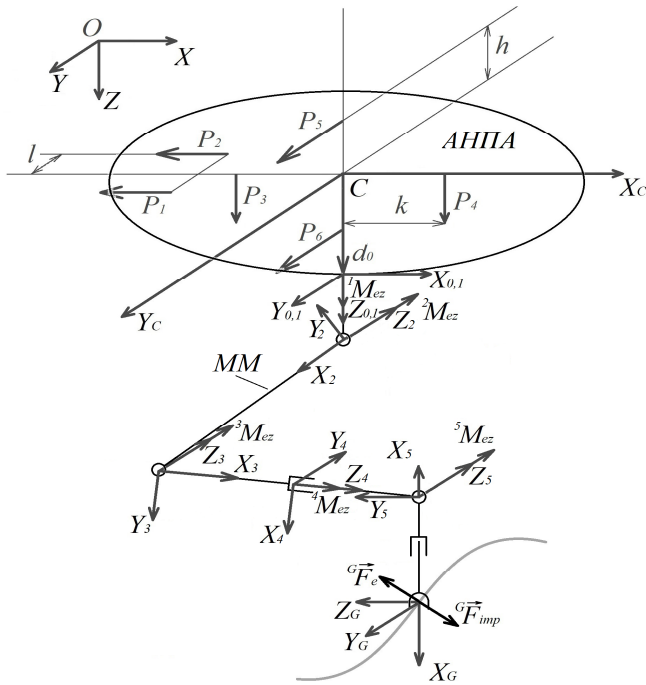


Рис. 1. АНПА с ММ, выполняющий контактную операцию

обеспечивается системой [9]. На основе вычисленных величин моментов ${}^i M_{ez}$ с учетом кинематической схемы ММ рассчитываются величина и направление вектора силы ${}^G \vec{F}_{imp} \in R^3$, оказываемой инструментом на объект работ в процессе выполнения контактной операции (рис. 1). Далее на приводы всех степеней подвижности ММ подаются сигналы управления, обеспечивающие дополнительные перемещения $\vec{d} \in R^3$ его рабочего инструмента в направлении желаемого вектора силы ${}^G \vec{F}_{imp}^* \in R^3$ для достижения желаемой величины силового воздействия инструмента на поверхность объекта. Чтобы инструмент ММ был способен оказывать требуемые силовые воздействия на поверхность объекта работ, необходимо в реальном масштабе времени создавать упор в точке крепления ММ к АНПА. Для этого на входы соответствующих двигателей аппарата подаются сигналы, компенсирующие силовые и моментные воздействия, оказываемые на этот АНПА со стороны многозвенника. Эти воздействия рассчитываются с помощью рекуррентного алгоритма решения обратной задачи динамики ММ с учетом вычисляемого вектора ${}^G \vec{F}_e = -{}^G \vec{F}_{imp}$, а также векторов силы и момента, обусловленных эффектами взаимовлияния между всеми степенями подвижности ММ, а также параметрами взаимодействия с окружающей жидкостью. При этом возникающие небольшие отклонения АНПА нивелируются системой [10], корректирующей конфигурацию ММ с учетом смещений аппарата. Таким образом удастся обеспечить стабилизацию АНПА и создать необходимый упор в точке крепления ММ к АНПА, позволяющий инструменту этого ММ оказывать желаемые силовые воздействия на поверхность объекта работ.

Заключение. Результаты исследования работы системы в Matlab/Simulink с визуализацией в симуляторе CoppeliaSim показали многократное повышение точности выполнения различных контактных манипуляционных работ с оказанием заданного усилия. Разработанная система не требует установки дорогих многокомпонентных сило-моментных датчиков, а ее реализация не вызывает принципиальных затруднений. В настоящее время готовится проведение натурального эксперимента с использованием реального подводного ММ, разработанного в ИПМТ ДВО РАН.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038,
<https://rscf.ru/project/23-71-10038/>

Разработанный метод реализуется следующим образом [8]. Сначала для каждого i привода ММ вычисляется момент, обусловленный силовым контактом инструмента ММ с объектом работ (рис. 1):

$${}^i M_{ez} = {}^i M_{dz} - {}^i M_{wz}, \quad i = \overline{1,6}, \quad (1)$$

где ${}^i M_{dz}$ – действующий на привод внешний момент, направленный вдоль оси шарнира i , который измеряется с помощью однокомпонентного датчика момента или наблюдателя момента нагрузки привода; ${}^i M_{wz}$ – аналитически рассчитанный момент, обусловленный эффектами взаимовлияния между всеми степенями подвижности ММ, а также гидростатическими и гидродинамическими силами сопротивления его движению, включая вязкие трения и присоединенные массы окружающей жидкости. Компенсация действующих на приводы моментов ${}^i M_{dz}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Antonelli G. Underwater Robots. Third Edition. Springer Tracts in Advanced Robotics. 2014. Vol. 96. P. 374.
2. Cieslak P., Ridaou P., Giergiel M. Autonomous Underwater Panel Operation by GIRONA500 UVMS: A Practical Approach to Autonomous Underwater Manipulation. Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2015. P. 529–536.
3. McLain T.W., Rock S.M., Lee M.J. Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system. Underwater Robots. 1996. P. 139–158.
4. Filaretov V.F., Konoplin A.Y. System of automatic stabilization of underwater vehicle in hang mode with working multilink manipulator. 2015 IEEE International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications (IC3INA). 2015. P. 132–137.
5. Lapiere L., Fraisse P., Dauchez P. Position/force control of an underwater mobile manipulator. Journal of Robotic Systems. 2003. Vol. 20. №. 12. P. 707–722.
6. Cui Y., Yuh J. A unified adaptive force control of underwater vehicle-manipulator systems (UVMS). Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003). 2003. Vol. 1. P. 553–558.
7. Katsura S., Matsumoto Y., Ohnishi K. Modeling of force sensing and validation of disturbance observer for force control. IEEE Transactions on industrial electronics. 2007. Vol. 54. №. 1. P. 530–538.
8. Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Юрманов А.П., Пятавин П.А. Способ позиционно-силового управления подводным аппаратом с многозвенным манипулятором для выполнения контактных манипуляционных операций с подводными объектами. Патент № 2789510 С1 РФ. МПК G05B 13/02. Заявка № 2022128925, 11.09.2022. Опубликовано 02.06.2023.
9. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Зуев А.В., Красавин Н.А. Метод синтеза систем высокоточного управления перемещениями подводных манипуляторов. Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4. С. 31–37.
10. Filaretov V.F., Konoplin A.Y. System of automatically correction of program trajectory of motion of multilink manipulator installed on underwater vehicle. Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 1441–1449.

N.A.Krasavin (IMTP FEB of the RAS, Vladivostok). **Method of position-force control of underwater vehicles with multilink manipulators for performing contact manipulation operations with underwater objects**

The paper presents a new method of position-force control of autonomous underwater vehicles with multilink manipulators for performing various contact manipulation operations, including the applying of a desired force on the work surface, while the vehicle is in the stabilized hovering mode over objects of work.

Р. П. ВАСИЛЕНКО, Н. А. КРАСАВИН

(Институт проблем морских технологий им. Академика М.Д. Агеева, Владивосток)

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ СО СТОРОНЫ МНОГОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА

Предложен метод синтеза систем автоматической стабилизации в режиме зависания автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащенных многозвенными манипуляторами (ММ). За счет установки на АНПА дополнительного движителя на поворотной платформе и согласованного управления тягами всех движителей аппарата обеспечивается компенсация динамических воздействий со стороны работающего ММ.

Введение. АНПА являются одним из перспективных средств освоения Мирового океана и способны выполнять широкий перечень исследовательских работ [1]. Установка ММ на АНПА [2-5] позволит расширить область применения этих аппаратов за счет выполнения контактных манипуляционных операций в режиме зависания над или вблизи объектов работ. Однако зависший в толще воды АНПА подвержен воздействию сил и моментов со стороны работающего ММ [6-8]. Эти воздействия отклоняют АНПА от начального положения, что затрудняет или делает невозможным выполнение требуемой операции.

Конструкции корпусов и конфигурации движительно-рулевых комплексов (ДРК) АНПА обеспечивают эффективное движение в крейсерском режиме, но затрудняют стабилизацию АНПА в режиме зависания при работающем ММ. Обозначенную проблему невозможно решить с помощью известных методов и подходов [6,7,9]. Поэтому предлагаемый доклад посвящен решению задачи разработки нового метода синтеза системы стабилизации АНПА, предполагающего установку на аппарат дополнительного движителя на поворотной платформе, а также согласованное управление тягами всех движителей аппарата для компенсации динамических воздействий со стороны ММ, выполняющего контактную операцию.

Расширение ДРК для обеспечения стабилизации АНПА. Типовой ДРК АНПА позволяет управлять им по пяти степеням свободы [10]. Для обеспечения работы АНПА с ММ предложено расширить ДРК дополнительным движителем на поворотной платформе (рис. 1). Этот движитель располагается на одной оси вращения с первым звеном ММ выше центра величины АНПА на выносном штоке, что позволяет главным образом компенсировать воздействия со стороны ММ, приводящие к смещениям аппарата по углам крена и дифферента.

На рисунке 1 введены следующие обозначения: $SXYZ$ – система координат, жестко связанная с АНПА; 1 – АНПА; 2 – ММ; 3 – маршевые движители; 4 – подруливающие движители; 5 – дополнительный движитель на поворотной платформе; T_A – упор дополнительного движителя; q_A – угол поворота поворотной платформы.

Для принятой компоновочной схемы (рис. 1) была получена зависимость элементов результирующих векторов сил и моментов от тяг, создаваемых движителями. На основе этой зависимости получены выражения, позволяющие рассчитывать желаемые значения тяг движителей исходного ДРК для компенсации динамических воздействий на АНПА со стороны ММ:

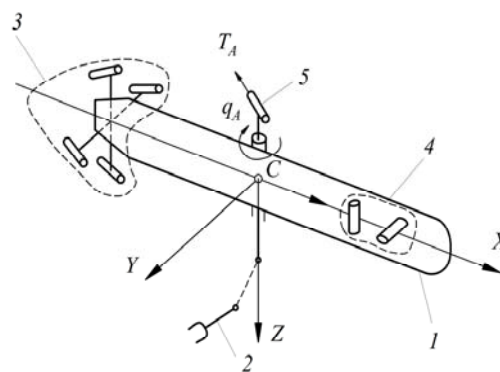


Рис. 1. Схема АНПА с расширенным ДРК

Научный руководитель: заместитель директора по научной работе к.т.н. Коноплин А.Ю.

$$\begin{aligned}
T_U^* &= \frac{F_X^*}{4 \cos \delta} - \frac{M_Y^*}{2L_S \sin \delta}, & T_D^* &= \frac{F_X^*}{4 \cos \delta} + \frac{M_Y^*}{2L_S \sin \delta}, & T_L^* &= \frac{F_X^*}{4 \cos \delta} + \frac{M_Z^*}{2L_S \sin \delta}, \\
T_R^* &= \frac{F_X^*}{4 \cos \delta} - \frac{M_Z^*}{2L_S \sin \delta}, & T_V^* &= -F_Z^*, & T_G^* &= F_Y^*.
\end{aligned}
\tag{1}$$

где $T_U^*, T_D^*, T_L^*, T_R^*$ – желаемые тяги маршевых движителей АНПА; T_V^*, T_G^* – желаемые тяги подруливающих движителей; δ – угол, образуемый продольными осями маршевых движителей с продольной осью CX АНПА; L_S – расстояние от центра величины АНПА до точек крепления маршевых движителей вдоль оси CX АНПА; $F_X^*, F_Y^*, F_Z^*, M_Y^*, M_Z^*$ – элементы результирующих векторов силы и момента, которые должны создаваться исходным ДРК АНПА для компенсации силовых и моментных воздействий со стороны ММ, выполняющего контактную операцию. Величины указанных воздействий идентифицируются в реальном масштабе времени с помощью метода [11].

Также были получены выражения, которые позволяют вычислять желаемые значения величин q_A и T_A , обеспечивающих стабилизацию АНПА по углам крена и дифферента с помощью дополнительного движителя:

$$T_A^* = \frac{\sqrt{M_X^{*2} + M_{Ay}^{*2}}}{L_A}, \quad q_A^* = \operatorname{atan} 2 \left(-\frac{M_X^*}{M_{Ay}^*} \right),
\tag{2}$$

где M_X^* – желаемое значение момента вокруг оси CX ; M_{Ay}^* – желаемое значение момента вокруг оси CY для дополнительного движителя. При этом вводятся специальные условия, позволяющие однозначно определять величину угла q_A^* и инвертировать тягу T_A^* для того, чтобы избежать скачкообразного изменения q_A^* .

Если для стабилизации АНПА по крену и дифференту возможностей дополнительного движителя недостаточно, величина M_{Ay}^* ограничивается. Часть сигнала управления, сформированного для стабилизации дифферента, которая не может быть отработана дополнительным движителем, учитывается при формировании M_Y^* в выражении (1).

В результате на основе разработанного метода с учетом выражений (1) и (2) была синтезирована система стабилизации АНПА.

Исследование синтезированной системы с помощью численного моделирования. Для исследования синтезированной системы была использована хорошо апробированная модель АНПА с ММ [3, 12]. Моделировалось выполнение различных манипуляционных операций. Разработанная система стабилизации показала свою работоспособность и эффективность. Угловые отклонения АНПА не превышали 8° , а линейные 6 см. Применение системы позиционного-силового управления ММ [11] совместно с синтезированной системой стабилизации обеспечило точность движения ММ по траекториям и точность оказания усилия на поверхность объекта работ, достаточные для выполнения распространенных контактных манипуляционных операций.

Заключение. Результаты проведенного численного моделирования подтвердили эффективность использования разработанной системы для выполнения контактных манипуляционных операций в режиме зависания АНПА над объектом или вблизи него. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на внедрении разработок в АНПА ММТ-3500 производства ИПМТ ДВО РАН и проведение натурных экспериментов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038,
<https://rscf.ru/project/23-71-10038/>*

ЛИТЕРАТУРА

1. Antonelli G. Underwater Robots. Third Edition // Springer Tracts in Advanced Robotics. 2014. Vol. 96.
2. Kostenko V. V., Bykanova A. Y., Tolstonogov A. Y. Developing the Multilink Manipulator System for an Autonomous Underwater Vehicle // 2022 IEEE International Conference on Ocean Studies (ICOS). 2022. P. 45–50.
3. **Konoplin A., Krasavin N.** Automatic Speed Control System for Manipulator Mounted on Underwater Vehicle. 2022 IEEE International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2022. P. 205–209.
4. Juan J. J. F. M. P., Pedro C. G. R. M., Penyalver J. S. A. Manipulation in the seabed: A new underwater manipulation system for shallow water intervention // IFAC Proceedings Volumes. 2012. Vol. 45. № 4. P. 314–319.
5. Cieslak P., Ridao P., Giergiel M. Autonomous underwater panel operation by GIRONA500 UVMS: A practical approach to autonomous underwater manipulation // 2015 IEEE International conference on robotics and automation (ICRA). 2015. P. 529–536.
6. Dunnigan M. W., Russell G. T. Evaluation and reduction of the dynamic coupling between a manipulator and an underwater vehicle // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1998. Vol. 23. № 3. P. 260–273.
7. Filaretov V. F., **Konoplin A. Y.** System of automatic stabilization of underwater vehicle in hang mode with working multilink manipulator // 2015 IEEE International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications (IC3INA). 2015. P. 132–137.
8. Kang J. I. et al. Experimental study of dynamic stability of underwater vehicle-manipulator system using zero moment point // Journal of Marine Science and Technology. 2017. Vol. 25. № 6. P. 18.
9. Киселев Л. В., Костенко В.В., Медведев А.В. К оценке динамических характеристик АНПА ММТ-3500 на основе модельных и экспериментальных данных // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 3(41). С. 33–44.
10. Kostenko V. V., Tolstonogov A. Y. Optimal Control Allocation for AUVs with Through-body Thrusters // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2022. Vol. 988. № 3. P. 032062.
11. **Коноплин А.Ю., Красавин Н.А.,** Юрманов А.П., Пятавин П.А., Кацурин А.А. Система позиционно-силового управления подводными аппаратами с многозвенными манипуляторами для выполнения контактных манипуляционных операций // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 4(42). С. 40–52.
12. Filaretov V. F., **Konoplin A.Yu., Zuev A.V., Krasavin N.A.** A method to synthesize high-precision motion control systems for underwater manipulator // International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM). 2021. Vol. 20. № 4. P. 625–636.

R.P. Vasilenko, N.A. Krasavin (Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok). **Stabilization system of an autonomous underwater vehicle with an additional thruster to compensate for dynamic impacts from a multi-link manipulator.**

Abstract. A method for the synthesis of automatic stabilization systems in the hover mode of autonomous underwater vehicles (AUV) equipped with multi-link manipulators is proposed. Due to the installation of an additional thruster on a rotary platform on the AUV and coordinated control of all AUV thrusters, compensation for dynamic impacts from the operating of manipulator is provided.

Н. В. КУЗНЕЦОВ

(Санкт-Петербургский государственный университет;
Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург)

М. Ю. ЛОБАЧЕВ

(Санкт-Петербургский государственный университет; Санкт-Петербург)

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКОЙ С ПРИЛОЖЕНИЕМ К ЗАДАЧАМ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

В данной работе для нелинейной системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) показаны возможности аналитических методов анализа ключевых характеристик: полосы захвата и полосы быстрого захвата.

Введение. Схемы фазовой автоподстройки являются нелинейными системами автоматического регулирования, реализующими принцип синхронизации ведущий-ведомый для фаз периодических сигналов. Первые схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ, phase-locked loops) были реализованы более 100 лет назад для подстройки частоты управляемого генератора электрических колебаний к частоте входного сигнала. Сегодня схемы ФАПЧ получили широкое распространение в глобальных навигационных системах (GPS, ГЛОНАСС) [1], микромеханических (МЭМС) гироскопах [2], [3], беспроводной связи [4], [5] и других приложениях. Так, в МЭМС гироскопах фазовая автоподстройка частоты используется управления частотой работы цифровых блоков интегральной схемы и исключения влияния ошибок, возникающих ввиду зависимости параметров механической части от изменения температуры и других внешних воздействующих факторов.

Соответствующие математические модели аналоговых ФАПЧ описываются нелинейными системами обыкновенных дифференциальных уравнений, и их глобальный анализ является сложной задачей [6]. Необходимость нелинейного анализа связана с задачами известных американских инженеров У. Игана и Ф. Гарднера об определении полос захвата и быстрого захвата, гарантирующих синхронизацию системы с определёнными свойствами [7, 8]. Возможности аналитических методов для решения этих проблем были показаны в работах [9-12]. Трудности точного определения полосы захвата и полосы быстрого связаны с необходимостью выявления скрытых участков границы глобальной устойчивости в пространстве параметров и анализа нелокального рождения скрытых аттракторов в фазовом пространстве [6], [12].

Заключение. В данной работе были показаны возможности аналитических методов анализа для решения проблем известных американских инженеров У. Игана и Ф. Гарднера [7-10].

Работа выполнена при поддержке программы Ведущие научные школы Российской Федерации (НШ-4196.2022.1.1) и СПбГУ (грант по Мероприятию 3, Pure ID 92424538).

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Kaplan and C. Hegarty, Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, 3rd ed. Artech House, 2017.
2. L. Aaltonen and K. Halonen, "An analog drive loop for a capacitive MEMS gyroscope," Analog Integrated Circuits and Signal Processing, vol. 63, no. 3, pp. 465–476, 2010.
3. N. Kuznetsov, Y. Belyaev, A. Styazhkina, A. Tulaev, M. Yuldashev, and R. Yuldashev, "Estimation of PLL architecture on MEMS gyroscope performance," Gyroscopy and Navigation, vol. 13, no. 1, pp. 44–52, 2022.
4. K. Du and M. Swamy, Wireless Communication Systems: from RF subsystems to 4G enabling technologies. Cambridge University Press, 2010.
5. R. Best, N. Kuznetsov, G. Leonov, M. Yuldashev, and R. Yuldashev, Tutorial on dynamic analysis of the Costas loop, IFAC Annual Reviews in Control, vol. 42, pp. 27–49, 2016.
6. Н.В. Кузнецов, Теория скрытых колебаний и устойчивость систем управления, Известия РАН. Теория и Системы управления, N5, 5-27, 2020.
7. F. Gardner, Phaselock Techniques, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.

8. W. Egan, Phase-Lock Basics, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
9. **N.V. Kuznetsov, M.Y. Lobachev**, M.V. Yuldashev, R.V. Yuldashev, M.S. Tavazoei, The Gardner problem on the lock-in range of second-order type 2 phase-locked loops, IEEE Transactions on Automatic Control, 2023 <https://dx.doi.org/10.1109/TAC.2023.3277896>.
10. **Н.В. Кузнецов, М.Ю. Лобачев**, М.В. Юлдашев, Р.В. Юлдашев, С.И. Вольский, Д.А. Сорокин. Об обобщенной задаче Гарднера для систем фазовой автоподстройки в электрических сетях. Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления, 498:71–75, 2021.
11. **Н.В. Кузнецов, М.Ю. Лобачев**, М.В. Юлдашев, Р.В. Юлдашев. О проблеме Гарднера для систем управления фазовой автоподстройкой частоты. Доклады Академии наук, 489(6):541–544, 2019.
12. **Н.В. Кузнецов, М.Ю. Лобачев**, Т.Н. Мокаев, Скрытая граница глобальной устойчивости в контрпримере к гипотезе Капранова о полосе захвата, Доклады РАН, 2023 (в печати).

N.V. Kuznetsov, M.Y. Lobachev (St. Petersburg State University, St. Petersburg, Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences). **Analysis and synthesis of phase-locked loop control systems**

Abstract. In this paper, for a nonlinear system of phase-locked frequency (PLL), the possibilities of analytical methods for analyzing key characteristics, which are pull-in and lock-in ranges, are demonstrated.

А. В. МОТОРИН, О. А. СТЕПАНОВ

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

В. А. ВАСИЛЬЕВ

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ПОГРЕШНОСТЕЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ

В рамках байесовского подхода ставится и решается задача идентификации модели погрешностей навигационной системы счисления, работающей по измерениям скорости от относительного лага и курса от бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Обсуждается выбор модели погрешностей и с использованием многоальтернативного алгоритма осуществляется идентификация ее параметров. Для решения задачи использованы реальные данные погрешностей системы счисления, полученные с использованием спутникового навигационного приёмника.

Введение. Известно, что инерциальные навигационные системы и системы построенные по принципу счисления пути обладают нарастающей во времени погрешностью вследствие интегрирования показаний инерциальных датчиков и/или датчиков скорости, содержащих в себе случайные и систематические ошибки. Вследствие этого актуальной остается задача коррекции таких систем по внешним данным. Для проведения коррекции может быть использована, например, информация от спутниковых навигационных систем (СНС), данные о поле рельефа дна, гравитационном поле, оптических свойствах подстилающей поверхности и т.д., которая обычно представляется в виде цифровой карты [1–7]. Используемые при этом алгоритмы выработки поправок часто основаны на теории байесовского оценивания. В линейных задачах для этих целей с успехом применяется фильтр Калмана (ФК) [8–11]. Нелинейные задачи решаются с использованием алгоритмов, основанных на гауссовской аппроксимации апостериорной функции плотности распределения вероятностей, приводящей к обобщенному и ансамблевому фильтрам Калмана [10–12], или с помощью процедур численного интегрирования основанных, например, на последовательных методах Монте-Карло, применение которых порождает так называемый фильтр частиц [10–14].

Для реализации таких алгоритмов коррекции в том числе необходимо располагать стохастической моделью погрешностей навигационной системы счисления (НСС). Такая модель характеризует погрешность выработки координат НСС при автономной работе и необходима для вычисления расчетной характеристики точности определения координат НСС на текущий момент, вырабатываемой в алгоритме коррекции в виде матрицы ковариаций погрешностей оценивания координат. При несоответствии модели реальным погрешностям НСС байесовские алгоритмы перестают быть оптимальными и помимо этого возникает существенное отличие между действительной ошибкой и расчетной характеристикой точности, что в ряде случаев приводит к расходимости алгоритма [4]. Таким образом, идентификация стохастической модели погрешностей НСС является актуальной задачей, которая может быть решена с позиций байесовского подхода с использованием методов многоальтернативной фильтрации [12–15].

Целью настоящей работы является идентификация модели погрешностей НСС, использующей данные о скорости от относительного лага и показания курса от бесплатформенной инерциальной навигационной системы на интервалах времени порядка одного часа. В работе рассматривается общая постановка и решение задачи идентификации модели с помощью многоальтернативного алгоритма, который затем используется для определения модели погрешностей НСС и ее параметров по реальным данным.

Постановка и общее решение задачи идентификации модели. Рассмотрим постановку и решение задачи идентификации модели в общем виде [13–16]. Пусть задан формирующий фильтр (ФФ) вида:

$$\begin{aligned}x_i &= \Phi_i(\theta)x_{i-1} + \Gamma_i(\theta)w_i, \\ \theta_i &= \theta_{i-1} = \theta,\end{aligned}\quad (1)$$

где x_i – вектор состояния; θ – вектор неизвестных параметров с заданной начальной ф.п.р.в.; $\Phi_i(\theta)$, $\Gamma_i(\theta)$ – известные матрицы ФФ, являющиеся в общем случае нелинейными вектор-функциями вектора θ ; w_i – p -мерный дискретный белый шум, единичной дисперсии; $i = 1, 2, \dots$ – дискретные моменты времени. Пусть также имеются векторные измерения вида:

$$y_i = H_i(\theta)x_i + \Psi_i(\theta)v_i, \quad (2)$$

$H_i(\theta)$, $\Psi_i(\theta)$ – известные матрицы ФФ, являющиеся в общем случае нелинейными вектор-функциями вектора θ ; v_i – m -мерный дискретный белый шум, единичной дисперсии. Используя такие измерения, требуется найти оптимальные байесовские оценки векторов x_i , θ .

Опираясь на тот факт, что при фиксированном векторе θ задача оценивания x_i является линейной, алгоритм ее решения может быть построен на основе процедур многоальтернативной фильтрации [14–16]. Зададим априорную аппроксимацию ф.п.р.в. вектора θ :

$$f_\theta(\theta / Y_i) \approx \sum_{j=1}^J \mu_0^j \delta(\theta - \theta^j), \quad (3)$$

где θ^j , $j = \overline{1 \dots J}$ – узлы сетки фиксированных значений вектора θ , μ_0^j коэффициенты аппроксимации ф.п.р.в. Для каждого значения θ^j сформируем ФК, таким образом составляя банк фильтров. На каждом шаге в банке ФК вычисляются частные прогнозы и оценки вектора состояния $\hat{x}_{i/i-1}^j$, \hat{x}_i^j и соответствующие им матрицы ковариаций $P_{i/i-1}^j$, P_i^j . С их использованием рассчитываются значения функции правдоподобия фильтра:

$$f_{y_i}(y_i / Y_{i-1}, \theta) \approx N(y_i; H_i^j \hat{x}_{i/i-1}^j, \Lambda_i^j), \quad (4)$$

где $H_i^j \hat{x}_{i/i-1}^j$ – математическое ожидание, а $\Lambda_i^j = H_i^j P_{i/i-1}^j (H_i^j)^T + \Psi_i^j (\Psi_i^j)^T$ – матрица ковариаций невязок измерений. Полученные значения функций правдоподобия используются для расчета коэффициентов μ_i^j аппроксимации апостериорной ф.п.р.в. вектора θ (3):

$$\mu_i^j = \frac{\mu_{i-1}^j f_{y_i}(y_i / Y_{i-1}, \theta^j)}{\sum_{j=1}^J \mu_{i-1}^j f_{y_i}(y_i / Y_{i-1}, \theta^j)}. \quad (5)$$

Оценки векторов θ , x_i рассчитываются согласно:

$$\hat{\theta}_i(Y_i) = \sum_{j=1}^J \mu_i^j \theta^j, \quad \hat{x}_i(Y_i) = \sum_{j=1}^J \mu_i^j \hat{x}_i^j, \quad (6)$$

а соответствующие им матрицы ковариаций погрешностей оценивания в виде:

$$\begin{aligned}P_i^0(Y_i) &= \sum_{j=1}^J \mu_i^j \theta^j (\theta^j)^T - \hat{\theta}_i \hat{\theta}_i^T, \\ P_i^x(Y_i) &= \sum_{j=1}^J \left[\mu_i^j (\hat{x}_i^j (\hat{x}_i^j)^T + P_i^j) \right] - \hat{x}_i (\hat{x}_i)^T.\end{aligned}\quad (7)$$

Получаемое решение при увеличении числа узлов сетки в (3) будет близко к оптимальному байесовскому решению.

Решение задачи идентификации погрешности НСС. Задача идентификации модели погрешностей НСС может быть решена в постановке (1), (2). Так как идентификация предполагается на коротких интервалах времени, порядка одного часа, для ее описания можно использовать декартову систему координат, оси которой направлены на север и восток соответственно. Тогда ФФ для модели погрешностей НСС может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned}
 x_{1,i} &= x_{1,i-1} + (x_{3,i-1} \sin K_i + (x_{4,i-1} + x_{5,i-1})V_i \cos K_i + x_{6,i-1})\Delta t, \\
 x_{2,i} &= x_{2,i-1} + (x_{3,i-1} \cos K_i - (x_{4,i-1} + x_{5,i-1})V_i \sin K_i + x_{7,i-1})\Delta t, \\
 x_{3,i} &= d_{\Delta V}x_{3,i-1} + \sigma_{\Delta V}\sqrt{1-d_{\Delta V}^2}w_{1,i}, \\
 x_{4,i} &= d_{\Delta K}x_{4,i-1} + \sigma_{\Delta K}\sqrt{1-d_{\Delta K}^2}w_{2,i}, \\
 x_{5,i} &= x_{5,i-1}, \\
 x_{6,i} &= x_{6,i-1}, \\
 x_{7,i} &= x_{7,i-1},
 \end{aligned} \tag{8}$$

где x_1, x_2 – погрешности координат, вырабатываемых НСС, в декартовой системе; $x_3 = \Delta V$, $x_4 = \Delta K$, – погрешности измерителей скорости и курса соответственно; $x_5 = \Delta \bar{K}$ – постоянная погрешность по курсу, обусловленная ветровым сносом; $x_6 = \Delta V_{\tau N}$, $x_7 = \Delta V_{\tau E}$ – северная и восточная составляющие скорости течения; V_i, K_i , – измеренные скорость и курс; $\sigma_{\Delta V}, \sigma_{\Delta K}$ – среднеквадратические погрешности (СКП) измерений скорости и курса; $d_{\Delta V} = e^{-\Delta t/\tau_{\Delta V}}$; $d_{\Delta K} = e^{-\Delta t/\tau_{\Delta K}}$; $\tau_{\Delta V}, \tau_{\Delta K}$ – интервалы корреляции погрешностей измерения скорости и курса соответственно. СКП скорости и курса $\sigma_{\Delta K}, \sigma_{\Delta V}$ считаются неизвестными и подлежащими идентификации, таким образом $\theta = [\sigma_{\Delta K}, \sigma_{\Delta V}]^T$.

В качестве измерений использованы разности координат, выработанных приемной аппаратурой СНС, и координат от НСС, записываемые в виде:

$$\begin{aligned}
 y_{1,i} &= x_{1,i} + v_{1,i}, \\
 y_{2,i} &= x_{2,i} + v_{2,i},
 \end{aligned} \tag{9}$$

где v_1, v_2 – белозумные погрешности СНС с известным СКО. Задача идентификации модели погрешностей НСС в этом случае формулируется как задача оценивания вектора состояния (8) и вектора неизвестных параметров $\theta = [\sigma_{\Delta K}, \sigma_{\Delta V}]^T$ по измерениям (9) и далее решается с использованием алгоритма (3)–(7). Отметим что, задавая различные стохастические модели погрешностей измерителей скорости, курса и течения можно расширить или модифицировать модель (8), дополнив ее соответствующими элементами вектора состояния. При этом встает вопрос о выборе наиболее подходящей модели. Ответ на этот вопрос и идентификация структуры модели путем выбора из нескольких альтернативных гипотез также может быть осуществлена в дальнейшем с использованием многоальтернативных алгоритмов [15, 16].

Результаты идентификации модели погрешностей НСС по реальным данным. На практике для идентификации модели погрешностей были использованы реализации погрешностей НСС, полученные в ходе испытаний на Ладожском озере, графики которых приведены на рис.1. Отметим, что галсы 1–6 и галсы 7–9 были сняты в разные дни. При решении задачи интервалы корреляции марковских процессов, описывающих погрешности по курсу и скорости, $\tau_{\Delta K}, \tau_{\Delta V}$, задавались равными 1,5 ч, что сделано с целью описания медленноменяющихся составляющих погрешностей датчиков.

Оценки составляющих скорости течения приведены на рис. 2. Видно, что оценки составляющих скоростей течения лежат в пределах $-0,6$ до $0,3$ м/с и в целом носят

согласованный по дням характер. Эти оценки также во многом согласуются с наблюдаемыми скоростями течения на Ладожском озере [17].

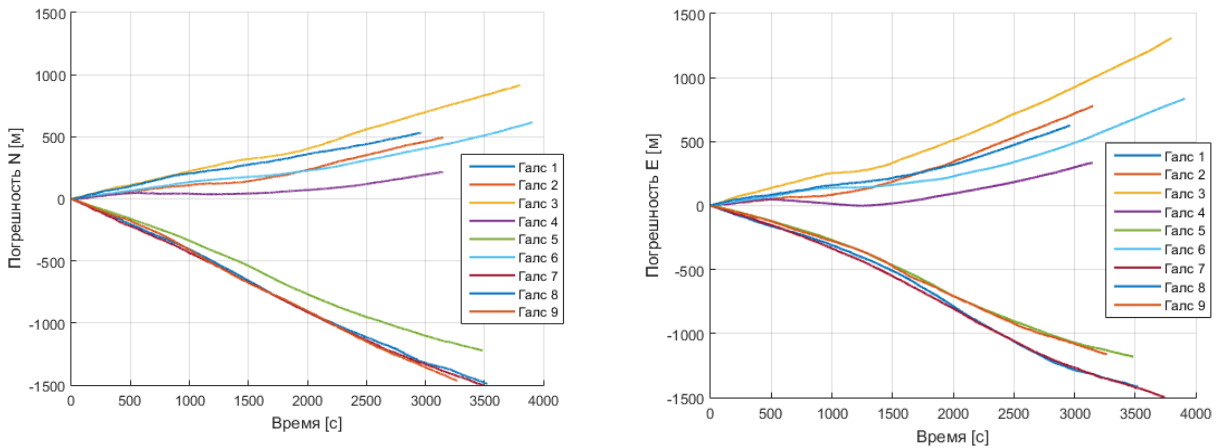


Рис.1 Измерения северной и восточной составляющих погрешностей НСС

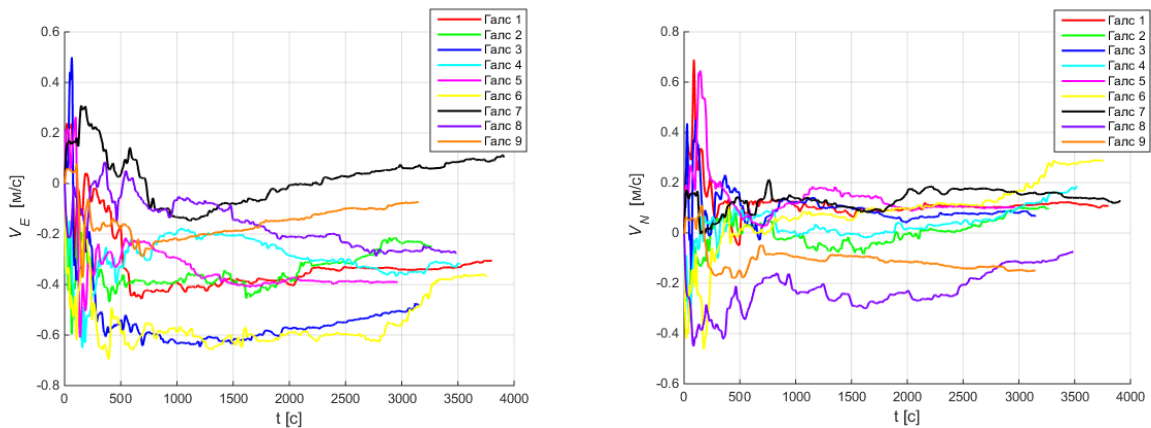


Рис. 2 Оценки составляющих течения

Оценки погрешностей скорости и курса приведены на рис. 3, а оценки соответствующих им СКП – на рис. 4. В оценках погрешности скорости рис. 3 явно видно смещение, что соответствует снятым реализациям погрешностей НСС. Во всех случаях НСС выдавала пройденный путь меньше, чем показала эталонная СНС, что соответствует отрицательной погрешности в скорости, и отчетливо просматривается в полученных оценках рис. 3. Оценки СКП скорости и курса (рис. 4) и лежат в пределах 0,1-0,15 м/с и 0,5-0,6° соответственно, что в целом согласуется с точностями используемых лага и БИНС.

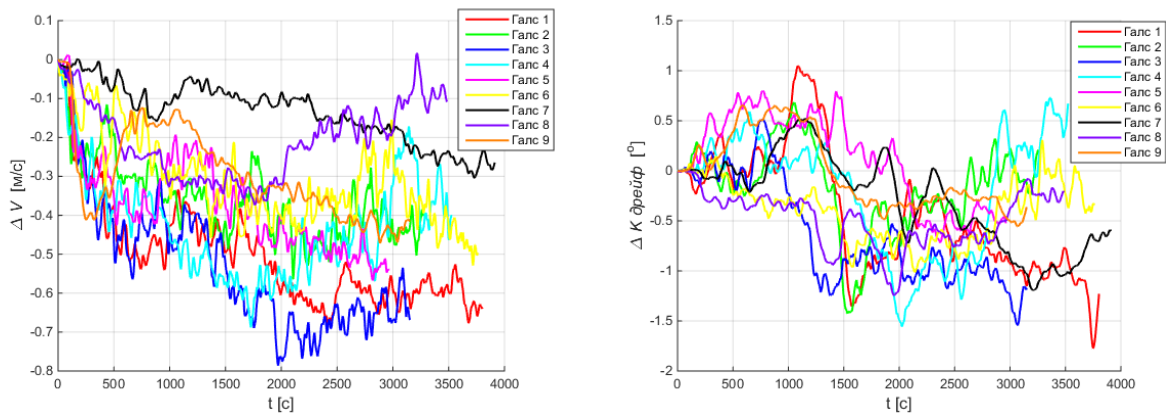


Рис. 3 Оценки погрешностей скорости и курса

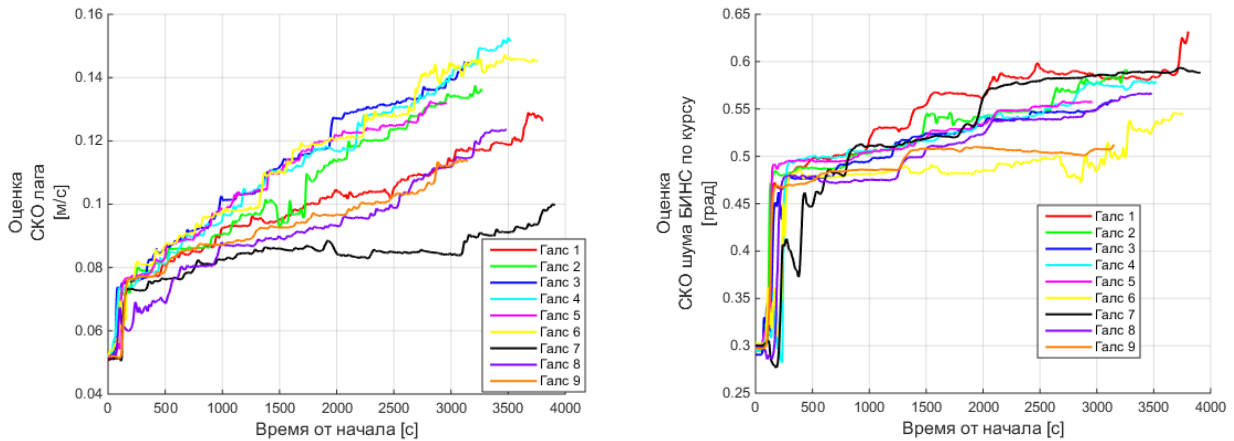


Рис. 4 Оценки СКП скорости и курса

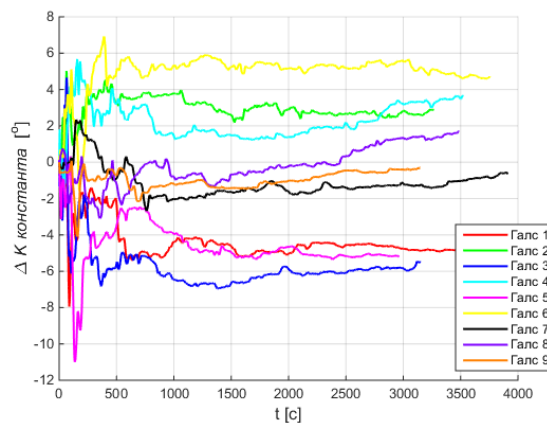


Рис. 5 оценки постоянной погрешности курса

На рис. 5 приведены оценки постоянной погрешности курса. Анализируя оценки постоянной погрешности курса рис. 5, можно определить, что ее СКО составляет порядка 1° . Однако видно, что погрешность существенно различна на разных галсах, что говорит о необходимости поиска альтернативных описаний погрешности скорости и курса, а также анализа потенциальной точности решения такой задачи, вычисляемой путем предсказательного моделирования [18, 19].

Заключение. По реальным данным с использованием многоальтернативного байесовского алгоритма проведена оценка составляющих модели погрешностей НСС и идентификация её параметров. Полученные по реальным данным оценки СКП измерений скорости и курса согласованы между собой и точностями используемых датчиков. Оценки составляющих погрешностей также лежат в пределах значений, соответствующих их физическому смыслу. Однако остается открытым вопрос верификации и поиска альтернативных вариантов описания моделей погрешностей НСС, а также анализа потенциальной точности решения такой задачи.

*Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 23-19-00626,
<https://rscf.ru/project/23-19-00626/>.*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Carreno, S. et al.**, A survey on Terrain Based Navigation for AUVs, OCEANS 2010 MTS, IEEE Seattle, IEEE, 2010, pp. 1–7.
2. **Vaman, D.**, TRN history, trends and the unused potential, 2012 IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conference (DASC), IEEE, 2012, pp. 1A3-1–1A3-16.
3. **Groves, P.**, Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition, Artech, 2013, 800 p.

4. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 1. Обзор алгоритмов // *Гироскопия и навигация*. 2015. Т. 23. №3. С. 102–125.
5. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 2. Современные тенденции развития // *Гироскопия и навигация*. 2015. Т. 91. №4. С. 147–159.
6. **Емельянец Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016.
7. **Джанджгава Г.И., Августов Л.И.** Навигация по геополям. М.: Научтехлитиздат, 2018. 296 с.
8. **Bergman, N.**, Recursive Bayesian estimation: Navigation and tracking applications, Sweden, Linkoping University, 1999, 219 p.
9. **Kalman R.E.** A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // *J. Basic Eng.* 1960. Т. 82. № 1. pp. 34–45.
10. **Chen, Z.**, Bayesian filtering: From Kalman filters to particle filters, and beyond, *Statistics*, 2003, vol. 182, no. 1, pp. 1–69.
11. **Sarkka, S.**, Bayesian Filtering and Smoothing, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013, 254 p.
12. **Doucet, A., Freitas, N., Gordon, N.**, Sequential Monte Carlo Methods in Practice, New York, NY, Springer New York, 2001, 590 p.
13. **Gustafsson, F.** et al., Particle filters for positioning, navigation, and tracking, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, vol. 50, no. 2, pp. 425–437.
14. **Дмитриев, С.П. Степанов, О.А.** Многоальтернативная фильтрация в задачах обработки навигационной информации // *Радиотехника*. 2004. № 7. С.11–17.
15. **Моторин, А. В.** Идентификация моделей погрешностей навигационных датчиков и средств коррекции методами нелинейной фильтрации дисс. уч. ст. Канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2017.
16. **Моторин, А. В. Степанов О. А.** Проблемно-ориентированный подход к решению задачи идентификации моделей погрешностей навигационных датчиков и оцениваемых сигналов // *Материалы пленарных заседаний 9-й Российской мультikonференции по проблемам управления*, Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016, С. 49–60.
17. **С. В. Калесник.** «Ладожское озеро». Гидрометеоиздат, 1968.
18. **Stepanov O.A., Motorin A.V.**, Performance Criteria for the Identification of Inertial Sensor Error Models // *Sensors*. 2019. Т. 19 № 9 С. 19–25.
19. **Степанов О.А., Исаев А.М.** Методика сравнительного анализа рекуррентных алгоритмов нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации на основе предсказательного моделирования. *Гироскопия и навигация*. 2023. Т. 32. № 3 (122). С. 48-55.

A.V. Motorin, O.A. Stepanov (Concern CSRI Elektropryor, ITMO University, St. Petersburg, Russia), V.A. Vasiliev (Concern CSRI Elektropryor, ITMO University, St. Petersburg Electrotechnical University LETI, St. Petersburg, Russia).
Identification Of Error Model Of A Dead-Reckoning Navigation System.

The problem of identifying the error model for a dead-reckoning navigation system using velocity from the water speed log and heading from the strapdown inertial navigation system is stated and solved within the bayesian approach. The selection of the error model is discussed and its parameters are identified using the multiple model algorithm. True dead-reckoning system errors obtained with the GNSS receiver are used to solve the problem.

УДК 621.396

Е.Г. ЛИТУНЕНКО, А.М. ГРУЗЛИКОВ, Н.В. КОЛЕСОВ, Ю.М. СКОРОДУМОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБМЕНОВ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СЕТИ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Предлагается структура имитационной модели сети подводных аппаратов для моделирования алгоритмов информационного обмена в сети. Приведено описание модели сети и результаты моделирования.

Введение. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) имеют широкий спектр применений с возможностью работать в экстремальных условиях, что позволяет им решать задачи по сбору информации в интересах геологоразведочных, поисковых, океанографических и других исследований. Ограничения по ресурсам АНПА делают невозможными миссии, где критичным является фактор времени, например, в задачах поиска и обследования затонувших объектов, патрулирования и т.д. В этих случаях используются сети АНПА [1 – 4], а информационное взаимодействие между аппаратами осуществляется с использованием гидроакустической связи.

Проектирование сети АНПА представляет собой сложную многофакторную задачу. Проверка предлагаемых технических решений является важной стадией проектирования. Макетирование, хоть и является неотъемлемой частью процесса проектирования, как правило, оказывается дорогостоящим и трудозатратным процессом, поэтому особое внимание уделяется имитационному моделированию процессов в сетях подводных аппаратов. Имитационное моделирование позволяет проводить исследования сетей, существенно различающихся по количеству узлов и их характеристикам, а также исследовать различные алгоритмы сети, сравнивая их между собой. Настоящий доклад посвящен описанию имитационной модели сети и методик оценки эффективности работы алгоритмов.

Алгоритмы информационного обмена в сетях подводных аппаратов. В предыдущих работах авторов показано, что при возникновении в узлах сети очереди сообщений на излучение порядок сообщений в выходной очереди влияет на время нахождения сообщения в сети [5, 6]. Для минимизации времени нахождения сообщений в сети предложены оптимальные алгоритмы упорядочивания выходной очереди по критерию минимума верхней границы общего и/или среднего времени доставки сообщений в сети. Алгоритмы предложены для случая, когда отсутствуют какие-либо предварительные упорядоченности в выходной очереди, а также для случаев, когда они существуют, при этом в предварительно упорядоченных группах могут быть разрешены или запрещены прерывания.

Другой важной задачей является маршрутизация сообщений в сети подводных аппаратов. Вопросы маршрутизации в сети рассматриваются в многочисленных публикациях на протяжении не одного десятилетия. По сути, все известные алгоритмы маршрутизации являются распределенными [7]. При этом каждый из них предполагает вычисление кратчайших путей для любой пары узлов сети связи на основе известного алгоритма Дейкстры. Далее для каждого узла заполняется таблица маршрутизации, куда заносится эта информация для каждого адресата в виде имени ближайшего узла на этом пути. В процессе функционирования сети эта информация обновляется путем взаимных обменов.

Предполагается, что для любого сообщения маршрут всегда существует, т.е. аппараты не расходятся слишком далеко друг от друга. В простейшем случае, когда узел-адресат находится на допустимом расстоянии, маршрут доставки одношаговый (не использующий ретранслирующих узлов). Каждый узел периодически излучает сформированную в нем последовательность сообщений, которая состоит из собственных сгенерированных в узле сообщений, а также из сообщений, поступивших в данный узел извне для ретрансляции к другому адресату. Ввиду подвижности аппаратов граф сети все время меняется и поэтому заново формируется перед каждой процедурой построения кратчайших путей. Граф сети (рис. 1) – это реберно взвешенный граф возможных связей, а именно, ребро (a,b) означает, что соответствующие аппараты находятся на расстоянии, меньшем или равном предельно допустимому. Ребра графа отмечены значениями дистанции между соответствующими аппаратами.

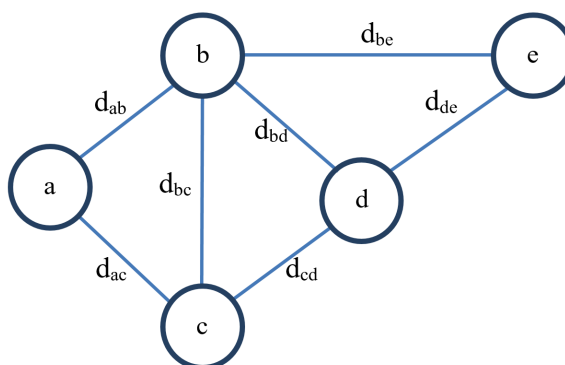


Рис. 1. Граф сети

К сожалению, в рассматриваемом случае упомянутый выше подход, основанный на использовании алгоритма Дейкстры, не может быть использован напрямую. Действительно, для гидроакустической сети характерно явление, связанное с «затенением» одного аппарата другим. В этом случае «затеняющий» аппарат оказывается между передающим и принимающим аппаратами и делает связь невозможной. Например, на рис. 1 аппарат (d) является затеняющим для аппаратов (c) и (e). В связи с этим при построении графа сети учитывается взаимное расположение аппаратов. Пусть граф задается списками смежности. Тогда

Алгоритм формирования графа сети из n узлов

Цикл по всем узлам i

1. Сформировать предварительный список для i -й вершины.

Выполнить для всех остальных j -х вершин

- вычислить расстояние d_{ij} до j -й вершины,
- если расстояние меньше или равно предельному, то ребро включается в предварительный список, иначе нет.

2. Сформировать окончательный список для i -й вершины.

Выполнить для всех остальных j -х вершин предварительного списка

- вычислить курсовой угол k_{ij} на j -ю вершину,
- курсовой угол k_{ij} сравнить с уже вычисленными курсовыми углами k_{ik} других вершин списка. Если $k_{ij} = k_{ik}$, то из этих двух вершин оставляется в списке та, расстояние до которой меньше.

Постановка задачи моделирования. Предполагается, что существует подводная сеть, состоящая из идентичных узлов, функционирующих по одному и тому же алгоритму. Сеть стационарна, что гарантирует постоянство средних значений интенсивностей потоков обменов (заявок), обслуживаний и очередей [2]. В результате взаимного обмена сообщениями каждому узлу известны координаты всех остальных узлов, что позволяет ему строить минимальные по расстоянию маршруты доставки сообщений. Для любого сообщения маршрут всегда существует, т.е. аппараты не расходятся слишком далеко друг от друга. Каждый абонент сети является принимающим, передающим и ретранслирующим. С заданным периодом абоненты сети передают пакет сообщений, который состоит из собственных сообщений, сгенерированных передающим абонентом, а также из сообщений, полученных от других абонентов на предыдущем периоде, которые необходимо ретранслировать.

Структура модели сети. При реализации модели используется объектно-ориентированный подход, при котором все элементы модели являются объектами соответствующих классов. Модель включает в себя следующие классы: класс узлов (абонентов) сети, отвечающий за координаты узла и траекторию движения; модем, отвечающий за обработку сообщений, излучение и прием сообщений из среды, а также маршрутизацию сообщений; класс «Генератор», передающий в модем команды на формирование излучения с заданной частотой; класс «Планировщик», отвечающий за упорядочивание выходной очереди сообщений в модеме перед излучением; класс среды распространения сигнала, отвечающий за перенос сообщений между абонентами и передачу их во входные очереди модемов. Тактирование модели для осуществления псевдопараллельного процесса моделирования и создание объектов классов осуществляется в общем потоке программы. Диаграмма классов в упрощенном виде приведена на рис. 2.

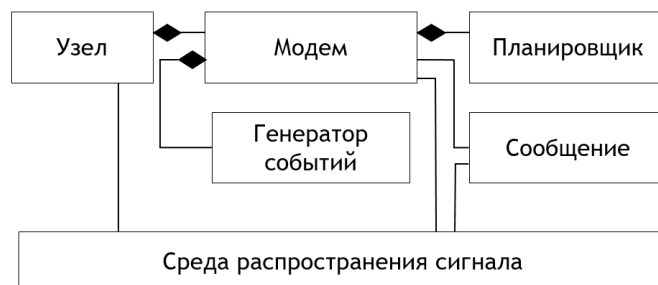


Рис. 2. Диаграмма классов

Процесс моделирования осуществляется псевдопараллельно, т.е. он разбивается на шаги. На каждом шаге все сообщения перемещаются на расстояние, определяемое длительностью шага. Время моделирования разбивается на отрезки, соотносимые с интервалами передачи отдельных узлов.

Предложенная модель позволяет произвести апробацию алгоритмов информационного обмена в сети подводных аппаратов и оценить их эффективность путем сравнения времени нахождения сообщений в сети при использовании предлагаемых алгоритмов планирования и других известных алгоритмов. При этом она дает возможность произвести оценку при различных параметрах сети, а именно, при разном количестве узлов, разных величинах интервалов информационных обменов, при различных условиях связи и т.д.

Результаты. В предложенной имитационной модели реализованы описанные выше алгоритмы упорядочивания и маршрутизации сообщений. Проведены проверки работоспособности этих алгоритмов для сетей, включающих в себя до 15 узлов. Проведено сравнение эффективности алгоритма упорядочивания сообщений выходной очереди, для случая отсутствия предварительных упорядоченностей, и алгоритма FIFO, при котором первое пришедшее на узел сообщение становится первым в выходной очереди, а последнее пришедшее сообщение – последним.

Заключение. В реферате предложена имитационная модель сети АНПА, для которой определены основные допущения, составные модули и их функционал. В имитационной модели реализованы алгоритмы упорядочивания сообщений. В ходе дальнейших исследований планируется расширение функционала имитационной модели и апробация на натуральных данных.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФ № 22-29-00339

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ramírez I. S., Bernalte Sánchez P. J., Papaelias M., Márquez F. P. G.** Autonomous underwater vehicles and field of view in underwater operations //Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Т. 9. – №. 3. – С. 277.
2. **Yang Y., Xiao Y., Li T.** A survey of autonomous underwater vehicle formation: Performance, formation control, and communication capability //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2021. – Т. 23. – №. 2. – С. 815-841.
3. **Инзарцев А. В., Киселев Л. В., Костенко В. В., Матвиенко Ю. В., Павин А. М., Щербатюк А. Ф.** Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. – Владивосток: Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2018. – 368 с.
4. **Федосов В.П. и др.** Сети связи для подводных автономных роботизированных комплексов. Таганрог: ЮФУ, 2018. 178 с.
5. **Litunenko E. G., Gruzlikov, A. M., Kolesov, N. V., Skorodumov, Iu. M.** Mathematical Model of Information Exchange in the Autonomous Underwater Vehicle Network //Engineering Proceedings. – 2023. – Т. 33. – №. 1. – С. 11.
6. **Грузликов А. М., Колесов Н. В., Литуненко Е. Г., Скородумов Ю. М.** Оптимизация информационных обменов в сети автономных абонентов. Известия российской академии наук. Теория и системы управления. – 2022. – № 6 – С. 56-64.
7. **Hamilton A., Holdcroft S., Fenucci D., Mitchell P., Morozs N., Munafò A., Sitbon J.** Adaptable Underwater Networks: The Relation between Autonomy and Communications // Remote Sensing. 2020. V.12.

E.G. Litunenko, A.M. Gruzlikov, N.V. Kolesov, Yu.M. Skorodumov (Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg, Russia).
Modeling the data exchanges in AUV acoustic network

Abstract. A simulation model for the network of autonomous underwater vehicles (AUV) is proposed for modeling the data exchange algorithms in the network. The description of the network model and simulation results are presented.

А. И. ЕВСТРАТЕНКОВА, Е. Н. ТЕНЮШЕВ, Н. А. БЫКОВА, Е. В. БАБАЕВ
(АО «Инерциальные технологии «Технокомплекс», Раменское)

РАЗРАБОТКА И СЕРТИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЬНОГО ПОДХОДА НА ПРИМЕРЕ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СНВ-1А

Рассматриваются наиболее существенные проблемы, возникающие в связи с необходимостью соответствия программного обеспечения инерциальных навигационных систем требованиям сертифицирующих органов, и практические пути их решения на примере разработки программного обеспечения навигационной системы СНВ-1А с использованием модульного подхода.

Введение. В настоящее время российская авиационная промышленность остро нуждается в современных отечественных инерциальных навигационных системах (ИНС). В связи с этим АО «Инерциальные технологии «Технокомплекс» ведет разработку малогабаритной бесплатформенной ИНС СНВ-1А, технические характеристики которой представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики СНВ-1А

Характеристика	Значение
Погрешности координат в инерциальном режиме	3,7 км (2σ)
Погрешности определения скоростей в инерциальном режиме	4 м/с (2σ)
Габариты	20.5x16.5x16.5 см
Масса	6 кг

Важнейшим аспектом данной разработки является необходимость обязательной сертификации навигационных систем в Российской Федерации в связи с их существенным влиянием на летную годность.

Настоящая работа посвящена рассмотрению наиболее существенных проблем, возникающих при разработке и сертификации программного обеспечения (ПО) ИНС ввиду значительной трудоемкости и высоким требованиям к уровню квалификации кадров. Предлагаются практические пути их решения с использованием модульного подхода к разработке архитектуры ПО на примере ПО СНВ-1А.

Применение модульного подхода к разработке архитектуры программного обеспечения и его преимущества при сертификации инерциальных навигационных систем.

1. Требования к сертификации систем, критичных с точки зрения безопасности.

Основополагающим для сертификации всех типов гражданской авиационной техники является документ ФАП-21 [1]. В зависимости от уровня компонента необходимо соответствие требованиям различных нормативных документов. Так, для ПО это КТ-178С [2] и ряд руководств Р-330 [3], Р-331 [4], Р-332 [5], Р-333 [6]. Для сложной электронной аппаратуры – КТ-254 [7]. Для уровня системы – стандарты Р-4754А [8] и Р-4761 [9]. Требования вышеперечисленных стандартов определяют необходимые мероприятия и данные, которые должны быть получены и предоставлены сертифицирующему органу.

Наибольшие затруднения возникают при разработке ПО в соответствии с требованиями стандарта КТ-178С [2], определяющего необходимость:

- разработки требований высокого уровня к ПО (требований к функциональности и техническим характеристикам);
- разработки архитектуры ПО и требований низкого уровня (полное описание алгоритмов, детальное описание каждой функции, достаточное для разработки исходного кода без использования дополнительной информации);
- разработки исходного кода ПО в соответствии со стандартами на кодирование ПО;

Научный руководитель: заместитель генерального директора по научной работе к.т.н. Некрасов А.В.

- верификации ПО с обеспечением полного покрытия кода тестами (включая покрытие требований и структурное покрытие).

2. Внедрение модульного подхода при разработке и сертификации программного обеспечения СНВ-1А.

При разработке ПО СНВ-1А был применен модульный подход к разработке архитектуры, суть которого заключается в построении архитектуры ПО на базе модулей – функционально законченных независимых алгоритмов, оформленных в виде отдельных файлов исходного кода, пригодных для повторного применения.

Основными целями внедрения данного подхода при разработке и сертификации ПО СНВ-1А являлись:

- повышение надежности ПО, уменьшение количества ошибок в исходном коде (за счет возможности проведения тестирования каждого модуля в отдельности);
- упрощение и оптимизация исходного кода ПО (архитектура ПО на базе модулей имеет четкую структуру);
- сокращение сроков разработки исходного кода и программной документации в соответствии с требованиями КТ-178С [2] (в связи с возможностью разграничения зоны ответственности исполнителей).

По итогам работ были достигнуты следующие результаты:

- архитектура ПО СНВ-1А построена на базе программных модулей, каждый из которых является независимым функционально завершённым компонентом ПО, прошедшим верификацию, и имеющим полный комплект документации в соответствии с требованиями КТ-178С [2];
- исходный код ПО СНВ-1А оптимизирован по количеству строк кода, возможности повторного использования компонентов, а также требуемого объема памяти процессора;
- значительно сокращены сроки разработки и тестирования ПО.

Результаты внедрения модульного подхода, полученные при разработке ПО СНВ-1А, представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

Результаты внедрения модульного подхода, полученные при разработке программного обеспечения СНВ-1А

Метрика	ПО без использования модульного подхода	ПО СНВ-1А
Количество строк исходного кода	120000	50000
Возможность повторного использования компонентов ПО	отсутствует	60 %
Требуемый объем памяти процессора (постоянное запоминающее устройство)	400 кбайт	180 кбайт
Требуемый объем памяти процессора (оперативное запоминающее устройство)	2000 кбайт	350 кбайт
Требуемое время разработки ПО	12 месяцев	3 месяца

Заключение. По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что использование модульного подхода к разработке архитектуры ПО приводит к получению значительных результатов по оптимизации исходного кода, успешному внедрению подходов к разработке и сертификации ПО в соответствии с требованиями КТ-178С [2], а также сокращению сроков разработки и тестирования ПО ИНС.

Применение данного подхода обеспечивает возможность успешной сертификации и приводит к существенному сокращению затрат, что позволит в перспективе провести разработку серии ИНС гражданского назначения в рамках программы импортозамещения.

Направлением дальнейших исследований является распространение модульного подхода к ПО автоматизированных средств контроля ИНС, используемых при проведении лабораторных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральные авиационные правила «Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21». Авиаиздат, 2019.

2. Квалификационные требования. Часть 178С. Требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники. Авиаиздат, 2016.
3. Руководство Р-330. Руководство по квалификации программных инструментов. Авиаиздат, 2016.
4. Руководство Р-331. Разработка и верификация на основе модели. Дополнение к документам КТ-178С и КТ-278А. Авиаиздат, 2016.
5. Руководство Р-332. Объектно-ориентированные технологии и связанные методы. Дополнение к документам КТ-178С и КТ-278А. Авиаиздат, 2016.
6. Руководство Р-333. Дополнение по формальным методам к документам КТ-178С и КТ-278А. Авиаиздат, 2016.
7. Руководство КТ-254. Руководство по гарантии конструирования бортовой электронной аппаратуры. Авиаиздат, 2011.
8. Руководство Р-4754А. Руководство по разработке воздушных судов гражданской авиации и систем. Авиаиздат, 2016.
9. Руководство Р-4761. Руководство по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования самолетов гражданской авиации – Авиаиздат, 2011.

A.I.Evstratenkova, E.N.Tenyushev, N.A.Bykova, E.V.Babaev (JSC "Inertial technologies of Technocomplex", Ramenskoye).
The usage of modular programming in software development and certification process by the example of the navigation system CHB-1A

Abstract. This paper reviews the most significant problems that arise due to necessity of navigation systems software to comply with the requirements set by certification authorities and practical ways to solve them using modular programming on the example of the navigation system CHB-1A.

А.А. ПРОЦЕНКО, А.В. ЗУЕВ, А.Н. ЖИРАБОК
(Институт проблем морских технологий им. М. Д. Агеева ДВО РАН,
Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток)

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЯМИ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ПОЯВЛЕНИЯ ПАРНЫХ ДЕФЕКТОВ

В работе разработан метод синтеза легко реализуемых систем обнаружения, идентификации и компенсации последствий парных дефектов в движителях подводных роботов. Эти системы за счет использования наблюдателей с переменной структурой обеспечивают точную оценку величин отклонений параметров движителей ПР от своих номинальных значений и ошибок в показаниях датчиков их угловых скоростей. Далее с учётом полученных оценок формируются дополнительные управляющие воздействия, которые позволяют сохранить работоспособность и обеспечить стабилизацию важнейших характеристик этих движителей при неожиданном появлении дефектов.

Введение. Важными компонентами подводных роботов (ПР), обеспечивающими их движение по заданным траекториям, являются движители [1]. Непредвиденные изменения каких-либо параметров движителей или появление ошибок в показаниях датчиков, которые могут быть обусловлены возникновением дефектов или воздействием со стороны внешней среды, могут привести к аварийным ситуациям или потере роботов. Одним из подходов к повышению надёжности ПР является оперативное обнаружение возникающих изменений параметров и ошибок, а также идентификация их величин [2] с последующей компенсацией их негативных последствий с помощью систем адаптивного управления.

В работе [2] предложено решение этой задачи, состоящее из трёх этапов. На первом этапе с помощью банка диагностических наблюдателей (ДН) осуществляется обнаружение отклонения одного из рассматриваемых параметров (электрического сопротивления цепи якоря электродвигателя $R_{\text{я}}$ или внешнего момента нагрузки $M_{\text{в}}(t)$), от номинального значения или возникновения ошибки в показаниях датчика угловой скорости вала движителя $\omega(t)$. На втором – с помощью наблюдателей с переменной структурой (НПС) идентифицируются величины обнаруженных изменений параметров и ошибок ($\hat{M}_{\text{в}}(t)$, $\hat{R}_{\text{я}}(t)$ и $\hat{\omega}(t)$). На третьем этапе формируется управляющий сигнал для движителя ПР, учитывающий идентифицированные величины отклонений параметров и ошибок и обеспечивающий сохранение основных динамических свойств движителя.

Недостатком метода, описанного в работе [2], является то, что каждый из предлагаемых ДН чувствителен к двум из трёх возможных отклонений параметров и ошибок, из-за чего при одновременно возникших двух или более из них определить какой именно параметр изменился не удаётся. Вследствие этого не удаётся идентифицировать величины функций $\hat{M}_{\text{в}}(t)$, $\hat{R}_{\text{я}}(t)$ и $\hat{\omega}(t)$, если две из них стали одновременно отличны от нуля. Таким образом, целью работы является создание новой системы адаптивного управления, позволяющей обнаруживать, идентифицировать и компенсировать последствия изменений сразу двух параметров движителей ПР или ошибок в показаниях их датчиков.

Разработка системы адаптивного управления. Для решения задачи идентификации парных изменений параметров или ошибок в показаниях датчиков предлагается добавить к банкам известных ДН (ДН-1, ДН-2, ДН-3) и НПС (НПС-1, НПС-2, НПС-3), описанным в работе [2], дополнительные НПС (так называемые виртуальные датчики [3]), позволяющие оценивать определённые элементы вектора состояния диагностируемого объекта даже в том случае, если

некоторые его параметры меняются неизвестным образом. В частности, они позволяют получать независимую от возникающих ошибок в датчике угловой скорости $\omega(t)$ оценку её реальной величины, которую можно будет в дальнейшем использовать в наблюдателях для обеспечения их нечувствительности к этой ошибке.

Первый дополнительный НПС-4, построенный по процедуре, описанной в [3], позволяет получить оценку $\omega_1^{\text{оц}}(t)$ величины $\omega(t)$ независимо от возникновения ненулевой функции $\hat{M}_B(t)$. Второй дополнительный НПС-5 позволяет получить оценку $\omega_2^{\text{оц}}(t)$ величины $\omega(t)$ независимо от возникновения ненулевой функции $\hat{R}_r(t)$.

Для обеспечения обнаружения парных ненулевых функций $\hat{M}_B(t)$, $\hat{R}_r(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ необходимо на входе ДН-1 заменить сигнал $y_1(t) = \omega(t) + \hat{\omega}(t)$, получаемый от датчика угловой скорости и содержащий возможную ошибку, на оценку $\omega_1^{\text{оц}}(t)$, генерируемый НПС-4, что обеспечит нечувствительность указанного наблюдателя к $\hat{\omega}(t)$. Аналогичным образом следует заменить сигнал $y_1(t)$ на входе ДН-2 на сигнал $\omega_2^{\text{оц}}(t)$, генерируемый НПС-5. В таком случае банк ДН позволяет определять одновременное возникновение двух разных ненулевых функций $\hat{M}_B(t)$, $\hat{R}_r(t)$ и $\hat{\omega}(t)$. Решение о конкретных парных ненулевых функциях будет приниматься на основании сигналов невязок $e_y^{(1)}$, $e_y^{(2)}$ и $e_y^{(3)}$ трёх ДН с помощью следующих правил:

- 1) если $e_y^{(1)}(t) \neq 0$, $e_y^{(2)}(t) \neq 0$ и $e_y^{(3)}(t) \neq 0$, то $\hat{M}_B(t) \neq 0$ и $\hat{R}_r(t) \neq 0$;
- 2) если $e_y^{(1)}(t) = 0$, $e_y^{(2)}(t) \neq 0$ и $e_y^{(3)}(t) \neq 0$, то $\hat{M}_B(t) \neq 0$ и $\hat{\omega}(t) \neq 0$;
- 3) если $e_y^{(1)}(t) \neq 0$, $e_y^{(2)}(t) = 0$ и $e_y^{(3)}(t) \neq 0$, то $\hat{R}_r(t) \neq 0$ и $\hat{\omega}(t) \neq 0$.

Далее для решения задачи одновременной идентификации величин отклонений параметров приводов от их номинальных значений и величин ошибок в показаниях датчиков угловых скоростей вращения движителей ПР следует воспользоваться одним из следующих правил.

1) Если из трёх функций $\hat{M}_B(t)$, $\hat{R}_r(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ функции $\hat{M}_B(t)$ и $\hat{R}_r(t)$ становятся ненулевыми, а $\hat{\omega}(t)$ остаётся равна нулю, величины $\hat{M}_B(t)$ и $\hat{R}_r(t)$ одновременно могут быть определены с помощью ранее полученных НПС-1 (3.7) и НПС-2 (3.8), соответственно.

2) Если $\hat{M}_B(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ не равны нулю, а $\hat{R}_r(t) = 0$, то величину $\hat{M}_B(t)$ можно найти с помощью НПС-1 (3.7), если подать на его вход вместо ошибочного показания датчика угловой скорости вращения движителя ПР оценку реальной величины этой - $\omega_1^{\text{оц}}(t)$, не зависящую от функции $\hat{M}_B(t)$. Эту оценку можно получить с помощью дополнительного НПС-4, синтез которого будет рассмотрен далее. В этом случае величину $\hat{\omega}(t)$ можно будет определить с помощью выражения $\hat{\omega}(t) = y_1(t) - \omega_1^{\text{оц}}(t)$. То есть дополнительное ведение НПС-4 позволит одновременно определять сразу две величины $\hat{M}_B(t)$ и $\hat{\omega}(t)$.

3) Если $\hat{R}_r(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ не равны нулю, а $\hat{M}_B(t) = 0$, величину $\hat{R}_r(t)$ можно определить с помощью НПС-2 (3.8), если на его вход также подать оценку реальной величины угловой скорости вращения движителя ПР - $\omega_2^{\text{оц}}(t)$, не зависящую от функции $\hat{R}_r(t)$. Эту оценку можно получить с помощью дополнительного НПС-5, синтез которого также будет рассмотрен ниже. Величина $\hat{\omega}(t)$ в этом случае определяется выражением $\hat{\omega}(t) = y_1(t) - \omega_2^{\text{оц}}(t)$. Это позволяет одновременно получать информацию о величинах $\hat{R}_r(t)$ и $\hat{\omega}(t)$.

4) Если все три функции $\hat{M}_B(t)$, $\hat{R}_r(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ начинают отличаться от нуля, то идентифицировать их величины не удаётся, так как в этом случае невозможно построить НПС, формирующий верную оценку $\omega(t)$.

После идентификации величин функций $\hat{M}_B(t)$, $\hat{R}_r(t)$ и $\hat{\omega}(t)$, для компенсации последствий изменения параметров движителей ПР и появления ошибок в показаниях датчиков, на основе известного метода синтеза нелинейных регуляторов [4] была разработана система, которая за счет формируемых дополнительных управляющих воздействий позволяет сохранить

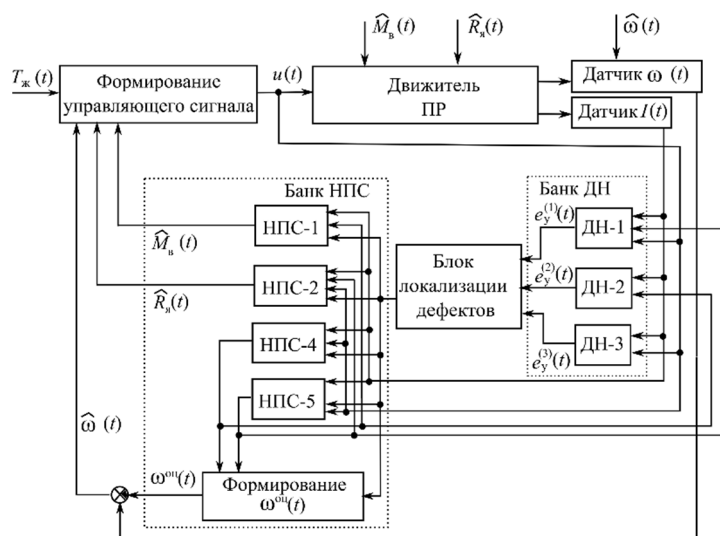


Рис. 1. Структурная схема системы адаптивного управления

работоспособность и обеспечить стабилизацию важнейших характеристик этих двигателей в процессе работы. Эти воздействия формируются с учётом идентифицированных при помощи НПС величин $\hat{M}_в(t)$, $\hat{R}_я(t)$ и $\hat{\omega}(t)$. Структурная схема полученной системы идентификации показана на рис. 1. На этом рисунке блок «Формирование $\omega^{oc}(t)$ » имеет на выходе величину $\omega^{oc}(t)$, полученную от НПС-4 в случае наличия ненулевой функции $\hat{M}_в(t)$, или от НПС-5 в других случаях.

Заключение. Разработан метод синтеза легкорезализуемых систем обнаружения, идентификации и компенсации последствий парных дефектов в двигателях подводных роботов. За счет использования дополнительных НПС обеспечивается точная оценка величин отклонений параметров двигателей ПР от своих номинальных значений и ошибок в показаниях датчиков их угловых скоростей, которые обусловлены появлением этих дефектов. На основе полученных оценок формируются дополнительные управляющие воздействия, стабилизирующие важнейшие характеристики двигателей в процессе работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, проект FZNS-2023-0011.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yuh J., Marani G., Blidberg D.** Applications of marine robotic vehicles. Intelligent Service Robotics. 2011. Vol. 4. No. 4. P. 221-231.
2. **Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Жирибок А. Н., А. А. Проценко.** Разработка системы аккомодации к дефектам в двигателях подводных роботов. Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. № 22(5). С. 262-271.
3. **Жирибок А. Н., Зуев А. В., Проценко А. А., Ир К. Ч.** Методы построения робастных виртуальных датчиков. Измерительная техника. 2022. № 6. С. 17-22.
4. **Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А.** Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука. 2005. С. 270.

A.A. Protsenko, A.V. Zuev, A.N. Zhirabok (M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, Far East Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok; Far Eastern Federal University, Vladivostok). **A method for synthesis of adaptive control systems for thrusters of underwater robots to compensate for the consequences of the appearance of paired faults**

Abstract. In this paper, a method for the synthesis of easily implemented systems for detecting, identifying and compensating for the consequences of paired faults in the thrusters of underwater robots has been developed. Due to the use of sliding mode observers, these systems provide an accurate estimation of the values of paired deviations of all parameters of thrusters from their nominal values and errors in the readings of sensors of their angular velocities, which are caused by the appearance of faults. Further, taking into account these estimates, additional control signals are formed, which allow to maintain operability and ensure stabilization of the most important characteristics of these thrusters in the event of unexpected faults.

УДК 004.942

В. В. ПРОКОПОВИЧ, Г. А. ПОДШИВАЛОВ, Л. А. МАРТЫНОВА, И. В. ПАШКЕВИЧ, В. С. БЫКОВА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ БОЛЬШОГО АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Рассмотрена безопасность движения большого автономного необитаемого подводного аппарата в процессе выполнения маршрутного задания. Для оценки влияния внешней среды на безопасное движение аппарата предложено использовать динамическую байесовскую сеть, для оценки влияния отказов устройств и механизмов – цифровой полигон в виде стенда моделирования с реализацией симуляции отказов.

Ключевые слова: большой автономный необитаемый подводный аппарат, динамическая байесовская сеть, стенд моделирования, внешняя среда.

Введение. В настоящее время ведущие морские державы увеличивают долю автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) [1], в том числе разрабатывают новые большие АНПА (далее – АНПА), способные в течение нескольких месяцев преодолевать расстояния порядка 10 тыс.км. В ходе преодоления протяженного маршрута АНПА проходит через районы, отличающиеся внешними условиями, оказывающими существенное влияние на безопасность движения АНПА. Под безопасностью движения АНПА будем понимать отсутствие угрозы выполнению АНПА маршрутного задания и достижению конечной точки маршрута (далее – угрозы). Безопасность движения АНПА зависит от внешней среды и надежности конструкции и оборудования АНПА [2]. Оценка безопасности движения АНПА позволяет корректировать маршрутное задание на этапе его формирования и принимать соответствующие решения по управлению движением на этапе эксплуатации АНПА. Ввиду новизны разработки больших АНПА как в России, так и за рубежом, публикации по комплексному решению указанной задачи обеспечения безопасности движения большого АНПА отсутствуют.

Цель работы – предложить подход к оценке безопасности движения АНПА.

Постановка задачи. Пусть определены: маршрутное задание АНПА в виде протяженного маршрута, который необходимо преодолеть в течение длительного времени; характеристики внешней среды районов, через которые проложен маршрут АНПА; координаты текущего положения АНПА в ходе выполнения маршрутного задания, вырабатываемые навигационной системой.

Необходимо сформировать оценку безопасности движения АНПА.

Предлагаемое решение. В качестве критерия безопасности примем вероятность выполнения АНПА маршрутного задания и прибытия АНПА в конечную точку маршрута [3]. Оценка влияния внешней среды на безопасность АНПА проведем с использованием динамической байесовской сети. Для оценки влияния отказов оборудования АНПА на его безопасность используем имитационное моделирование.

Будем рассматривать следующие типы внешней среды: открытые воды; прибрежные воды; морской лед; береговой припай [4], при этом состояние внешней среды охарактеризуем процентным соотношением типов сред, например, открытые воды – 70%; прибрежные воды – 15%; морской лед – 10%; береговой припай – 5%. Открытые воды представляют собой районы, удаленные от прибрежной и транспортной полосы [4], и угроза безопасности АНПА возникает при его всплытии на поверхности воды из-за высокой волны, сильного ветра или повышенного судоходства [4]. Прибрежные воды представляют собой участок раздела между сушей и океаном, характеризуются высокой плотностью судов, нахождением инженерных сооружений, рыболовных сетей, проведением водолазных работ, слабой прозрачностью воды, сильными течениями, быстрым пространственным и временным изменением глубины, сильным волнением на мелководье, появлением группы островов, что представляет собой существенную угрозу безопасности АНПА.

Морской лед и айсберги создают опасность АНПА из-за столкновения с ним. Береговой припай представляет собой неподвижный лед, прикрепленный к берегу, состоящий из крупных льдин, разделенных трещинами, иногда полыньями, чем существенно затрудняет навигационные определения АНПА.

В связи с невозможностью получения точного прогноза внешних условий на длительный горизонт для оценки вероятности выполнения маршрутного задания сформируем динамическую байесовскую сеть [5]. Для этого построим ориентированный взвешенный граф влияния внешних условий на вероятность выполнения маршрутного задания. Вершины графа соответствуют случайным величинам: параметрам окружающей среды, состоянию АНПА и систем АНПА, а ребра – непосредственным вероятностным взаимосвязям между случайными величинами.

Покроем район нахождения АНПА сеткой с определенным шагом и полагаем, что известны по экспертным оценкам или базам данных [6-8] для каждого узла сетки процентное соотношение типов среды и вероятности изменения процентного соотношения типов среды при переходе из одного узла сетки в другой в процессе движения АНПА. Пусть также известны вероятности влияния: типов среды на параметры среды, типов среды на состояние систем АНПА, параметров среды на состояние систем АНПА, состояние систем АНПА на безопасность АНПА.

Для определения совместной вероятности выполнения маршрутного задания специально разработан алгоритм, на вход которого необходимо подать координаты текущего положения АНПА.

Шаг 1. Поскольку неопределенность оценки местоположения АНПА в открытой воде низкая из-за относительно точной навигации, а неопределенность подо льдом существенно выше из-за относительно неточной подводной навигации, расчет вероятности фактической внешней среды в месте положения АНПА определим сочетанием прогнозируемой внешней среды и прогнозируемого положения АНПА с использованием таблицы условной вероятности [4].

Шаг 2. Расчет вероятности изменения процентного соотношения типов среды в процессе движения АНПА при переходе от момента времени $t-1$ к t .

Шаг 3. Расчет вероятности влияния состояния среды на параметры среды (температура воды, рельеф дна, волнение, глубина, сплоченность льда, толщина льда, течение).

Шаг 4. Расчет вероятности влияния параметров среды на работу систем АНПА.

Шаг 5. Расчет вероятности влияния работы систем АНПА на возникновение угрозы невыполнения маршрутного задания.

Получение оценки вероятности выполнения маршрутного задания позволяет обоснованно принять решение по безопасному движению АНПА. Если вероятность оказалась выше некоторого заранее заданного порогового значения то:

- на этапе подготовки АНПА к выполнению маршрутного задания принимаем решение по повышению надежности забортного оборудования и стойкости корпуса АНПА к воздействию внешних условий, по сокращению маршрута и прокладки его в более благоприятных условиях отсутствия навигационной безопасности;
- на этапе эксплуатации АНПА принимается решение о выполнении мер, направленных на повышение безопасности, например, реконфигурации системы управления движением [9].

С использованием разработанного алгоритма проведены численные эксперименты по оценке безопасности движения АНПА по одному из участков Северного Морского пути, характеризующему открытой водой, прибрежными водами, сплоченным льдом разной балльности и береговым припаем.

Влияние отказов на движение АНПА. При возникновении отказов оборудования АНПА его функционирование продолжается в соответствии с алгоритмами, заложенными в систему управления АНПА, в том числе и на случай возникновения отказов оборудования или систем [10]. Оценку влияния отказов на безопасность движения АНПА целесообразно проводить на цифровом полигоне – стенде имитационного моделирования функционирования АНПА. Наиболее полное воспроизведение функционирования систем АНПА потребовало формирования адекватных данных, подаваемых на вход каждой из систем АНПА. По результатам анализа данных, поступающих на вход алгоритмов функционирования систем АНПА, определен состав программных модулей и цифровых двойников (программных имитаторов) оборудования, которое должно быть размещено на стенде для полноценной работы штатных алгоритмов функцио-

нирования АНПА. Предусмотрена реализация в имитаторах (цифровых двойниках) отказов как системы в целом, так и отдельных ее составляющих, с последующим учетом отказов при моделировании ее функционирования. В результате для стенда моделирования функционирования АНПА разработано порядка семидесяти программных имитаторов оборудования АНПА и исполнительных механизмов.

Для оценки возможности АНПА в случае отказа оборудования продолжать движение искусственно формировались отказы. Для этого:

- сформирована структура, определено организационно, где и как формировать неисправности оборудования, какой программе и по какому протоколу передавать данные о неисправности и т.д.;
- создан банк данных вероятных неисправностей;
- разработаны алгоритмы разыгрывания неисправностей и их программная реализация;
- разработаны протоколы передачи неисправностей в имитаторы оборудования;
- разработан интерфейс автоматизированного рабочего места оператора (АРМ), формирующего неисправности и отображающего результаты функционирования систем АНПА;
- разработан протокол информационно-технического взаимодействия программы АРМ оператора с имитаторами оборудования;
- разработаны алгоритмы восстановления работы АНПА после выявления неисправности [11].

Поскольку возникновение неисправности в ходе выполнения маршрутного задания носит вероятностный характер, и прогнозирование момента времени, в который произойдет отказ, заранее невозможно, использована вероятностная модель формирования отказа. Появление отказа в случайный момент времени позволяет исключить человеческий фактор из процесса формирования отказов, так как отказ может произойти при произвольном сочетании параметров систем АНПА. Кроме того, возникновение отказа может произойти одновременно в разных системах, и случайность приближает возникновение отказа к более объективному ее формированию по сравнению с вариантом ручного задания оператором.

Заключение. В целях обеспечения безопасности движения АНПА разработан подход к ее оценке, учитывающий влияние внешних условий путем использования динамической байесовской сети и влияние отказов оборудования АНПА путем использования цифрового полигона в виде стенда имитационного моделирования функционирования АНПА.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 23-29-00803.

ЛИТЕРАТУРА

1. Navy Large Unmanned Surface and Undersea Vehicles: Background and Issues for Congress. 2020. Свободный доступ : <https://sgp.fas.org/crs/weapons/R45757.pdf>. (Дата обращения 24.05.2023).
2. Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. К вопросу о надежности автономного необитаемого подводного аппарата с мультиагентной архитектурой системы управления // Информационно-управляющие системы. 2016. № 5 (84). С. 25-34.
3. Термины МЧС России. Риск, или степень риска. Свободный доступ <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/terminy-mchs-rossii/term/332>. (Дата обращения 24.05.2023).
4. Yang R., Liu Y., Utne I. B., Paltrinieri N. Dynamic Risk Analysis of Operation of the Autonomous Underwater Vehicle // The 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management. Italy. June 2020. DOI:10.3850/978-981-14-8593-0_4118-cd.
5. Jensen, F.V and Nielsen T.D. Bayesian Networks and Decision Graphs . — Springer, — 2007. — New York, NY 10013, USA. — p.447.
6. Генерализованные карты состояния ледяного покрова в арктических и замерзающих морях России и гренландского моря. <http://www.old.aari.ru/main.php?lg=0&id=17> (Дата обращения 24.05.2023)
7. Исторический массив общей и частных сплоченностей и возрастных градаций ледяного покрова СЛО. <http://old.aari.ru/projects/ecimo/ModuleLoad.php?mod=d0001&in=1>. (Дата обращения 24.05.2023)
8. Annual 2022 Global Climate Report . Свободный доступ:
9. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>. (Дата обращения 24.05.2023).
10. Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. Подход к реконфигурации системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // Гирроскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 2 (109). С. 131-146.

11. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И. Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1 (162). С. 50-58.

V.V. Prokopovich, G.A. Podshivalov, L.A. Martynova, I.V. Pashkevich, V.S. Bykova (Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg, Russia). **Assessment of motion safety of a large autonomous underwater vehicle**

Abstract. The paper focuses on the motion safety of a large AUV performing the mission. It is proposed to use the dynamic Bayesian network for estimating the environmental effect on the motion safety, and to use the digital test site being a simulation stand with failure simulation for estimating the effect of the equipment failures.

Д. А. НАЗАРОВ

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Рассматривается задача обеспечения параметрической надежности управляемых технических систем на этапе их проектирования. В качестве методологической основы решения используется функционально-параметрический подход в теории надежности, описывающий систему в виде функциональной связи выходных характеристик от параметров элементов. Для анализа параметрического дрейфа используется область работоспособности в пространстве параметров элементов системы, а построение деградационных моделей применяются предметные онтологии, отображающие конструкционные особенности объекта и параметры условий эксплуатации.

Введение. Задача управления движением часто связана с риском причинения вреда здоровью и жизни людей, поэтому анализ возможных рисков является важной частью процесса проектирования и разработки управляемых объектов. В основе многих таких рисков является отказ систем или целых объектов. Одним из подходов к обеспечению надежности, отказоустойчивости технических систем, а также снижению рисков, связанных с их отказом, основан на анализе влияния параметрического дрейфа на качество функционирования системы. Как правило, подходы к анализу параметрического дрейфа, возникающего по причине практически неизбежных деградационных процессов в элементах систем, основываются на достижении границы поля допуска каждого параметра в отдельности, что принимается за отказ компонента. Такой подход позволяет построить модель на основе бинарного состояния элементов, например, структурная функция [1]. Однако, такой подход не позволяет анализировать влияние на качество функционирования системы совместного дрейфа параметров, что может привести к некорректному ее функционированию или отказу до достижения границ допуска параметров отдельных элементов. В этом случае система должна описываться функциональной моделью, устанавливающей связь между выходными характеристиками системы и параметрами ее элементов (внутренних параметров). Дрейф параметров зависит от ряда факторов помимо естественных физико-химических процессов: от условий эксплуатации, взаимного влияния компонентов объекта вследствие конструкционных особенностей. Анализ совместного влияния параметрических возмущений на работоспособность системы удобно выполнять в пространстве внутренних параметров в пределах так называемой области работоспособности (ОР) – ограниченном множестве точек пространства внутренних параметров, в которых система считается работоспособной [2]. Моделирование процессов дрейфа параметров под влиянием факторов внешней среды и внутренних процессов износа и старения требует учета количественных характеристик этих факторов, моделей изменения параметров во времени. Одной из моделей, позволяющей описывать все необходимое разнообразие как влияющих, так и зависимых физических характеристик, разнообразные параметры внешней среды и условий эксплуатации, является предметная онтология [3-4].

В данной работе рассматривается использование интеллектуальных систем в рамках онтологического подхода к моделированию процессов параметрического дрейфа и исследования их влияния на работоспособность технических объектов.

Понятие области работоспособности. Понятие ОР, как правило, имеет отношение к функционально-параметрическому направлению теории надежности [5], когда исследуется модель системы, связывающая ее выходные характеристики $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ с внутренними параметрами $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ в виде зависимостей:

$$y_i = y_i(x), i = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

Выходные параметры представляют характеристики системы, интересующие потребителя, которые должны удовлетворять требованиям, указанным в техническом задании, и обычно выражающиеся как ограничения:

$$y_{i \min} < y_i(\mathbf{x}) < y_{i \max}, \forall i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Ограничения (2) определяют работоспособное состояние системы, поэтому называются условиями работоспособности (УР), а их нарушение считается отказом системы. К нарушению УР может привести неудачное проектное решение либо дрейф параметров элементов, возникающий под влиянием факторов внешней среды и внутренних процессов износа и старения. Варьирование внутренних параметров обычно рассматривается внутри заданных допусков на их физическую реализуемость:

$$x_{i \min} < x_i < x_{i \max}, \forall i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Одним из способов исследования влияния отклонений внутренних параметров на работоспособность системы является определение характеристик области в пространстве этих параметров, ограниченном брусом (3), для которых будут выполняться УР (2):

$$D_x = \{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n \mid y_{i \min} < y_i(\mathbf{x}) < y_{i \max}, \forall i = 1, 2, \dots, m\}. \quad (4)$$

Область D_x , определяемая выражением (4), называется областью работоспособности в пространстве параметров элементов системы, заданной моделью (1) при заданных УР (2).

Использование онтологий позволяет описать структуру системы любой сложности и степени детализации с любыми известными видами взаимосвязей между ее элементами и внешними воздействиями. Такой подход к представлению структуры технического объекта с учетом взаимосвязей его элементов и факторов, вызывающих отказы, активно используется в программных системах по прогнозированию и управлению состоянием (PHM – Prognostic Health Management). В таких системах, как правило, подробно описывается иерархия элементов с возможными причинами их отказа с указанием количественных характеристик в виде интервалов допуска и текущих их значений [3] или вероятностные свойства: плотность распределения отказов, средняя наработка до отказа и т.д. [4]. На базе подобного описания становится возможным построение дерева отказов с выявлением причин их возникновения, а также построение рассуждений о состоянии системы в виде продукций на основе логики предикатов, выражающих состояние отдельных узлов в иерархии элементов, – например, модель OntoProg [3]. Онтологический подход также может быть использован для построения деградационной модели сложной системы. При описании ее структуры экспертом указываются факторы, влияющие на рабочие характеристики и износ каждого элемента. Структуру системы формируют теоретико-множественные отношения «a-part-of», описывающие иерархию элементов, а их влияние друг на друга – отношениями, основанными на изменении физических параметров деградационной модели элемента. Так, вращающийся вал с течением времени из-за трения способен повышать температуру окружающих элементов, что может быть учтено в использованной модели дрейфа сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов электронной схемы. Вращающийся вал с течением времени может стать источником вибраций, оказывая негативное влияние на качество контактов электронных компонентов, ускоряя разрушение пайки, что может быть отражено в соответствующей модели отказа электронной платы.

Заключение. При управлении движением часто может быть важно учитывать риски возникновения ситуаций, угрожающих здоровью и жизни людей по причине технических отказов, вызванных условиями эксплуатации и проектными решениями. Одним из путей снижения техногенных рисков является повышение параметрической надежности технических объектов на основе анализа причин параметрического дрейфа. В работе предложен подход к учету параметрического дрейфа элементов системы в рамках функционально-параметрического подхода в теории надежности на основе деградационной модели, построенной с помощью предметных онтологий, учитывающих конструкционные особенности, условия эксплуатации и особенности конкретных элементов, составляющих системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ушаков И.И.** Курс теории надежности систем. Учебное пособие. — М.: Дрофа, 2008. — 239 с.
2. **Назаров Д.А.** Использование областей работоспособности для оптимального выбора номиналов параметров // Информатика и системы управления. – 2011. – №2(28). – С. 59-69..
3. **Nuñez D. L., Borsato M.** OntoProg: an ontology-based model for implementing prognostics health management in mechanical machines. *Advanced Engineering Informatics*. 2018. № 38. P. 746-759. DOI: 10.1016/j.aei.2018.10.006.
4. **Venceslau A., Lima R., Guedes L.A. and Silva I.** Ontology for computer-aided fault tree synthesis. *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*. 2014. P. 1-4
5. **Абрамов О.В.** Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности // Информатика и системы управления. 2014. № 4(42). С. 64-77.

D.A. Nazarov (Institute of automation and control processes, Vladivostok). **Intelligent system for providing parametric reliability based on the functional-parametric approach**

Abstract. The problem of ensuring the parametric reliability of controlled technical systems at the stage of their design is considered. As a methodological basis for the solution, a functional-parametric approach in reliability is used, which describes the system as a function of output characteristics from the parameters of elements. For the analysis of parametric drift, the acceptability region inside the system parameter space is used, and the construction of degradation models uses ontologies that reflect the structural features of the object and the parameters of operating conditions.

УДК 004.942

В.С.БЫКОВА, А.И. МАШОШИН, А.А. ПАВЛОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург)

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ДОННЫХ ОБЪЕКТОВ

Применение нейронных сетей для распознавания всегда связано с проблемой формирования обучающей выборки. В случае обработки гидроакустических и оптических данных съемки морского дна вопрос недостаточности обучающего материала стоит особенно остро. В работе описан подход к решению этой проблемы, заключающийся в создании имитационных данных, и приведены результаты проверки работы нейронной сети на тестовой выборке зашумленных данных.

Введение. Применение различных средств обследования дна, например, гидролокатора бокового обзора (ГБО), многолучевого эхолота (МЛЭ), профилографа (ПФ) в составе автономного обитаемого подводного аппарата (АНПА) позволяет проводить инспекции морского дна, что связано с обнаружением объектов в толще воды (в частности, кабелей и трубопроводов) [1].

Для распознавания обнаруженных донных объектов по данным средств мониторинга дна в мире разработано большое количество алгоритмов. Однако, несмотря на это, на сегодняшний день задачу нельзя считать успешно решённой, что диктует необходимость разработки новых алгоритмов.

В последние годы впечатляющие результаты при распознавании многомерных образов достигнуты за счёт глубокого обучения искусственных нейронных сетей (ИНС) [2]. Делаются попытки применения ИНС и для распознавания донных объектов [3-7]. В работе [3] описывается использование обученной нейронной сети YOLOv5 для обнаружения объектов на данных подводных камер МЭС. В работах [4-7] авторы описывают методы применения свёрточных нейронных сетей для распознавания донных объектов по данным гидролокаторов бокового обзора.

Однако на этом пути стоит проблема, заключающаяся в том, что для глубокого обучения ИНС необходимо получение большого объёма обучающего материала, что в случае с донными объектами в большинстве случаев не представляется возможным. Ввиду этого было предложено получать этот обучающий материал искусственно путём моделирования образа объекта поиска на выходе каждого средства мониторинга дна в различных условиях наблюдения объекта поиска [4,7].

Целью представляемой работы является описание подхода к формированию выборки для обучения нейронной сети на смоделированных данных средств обнаружения и проверка работы нейронной сети на тестовых данных реального средства мониторинга дна.

Формирование обучающей выборки. Для проведения моделирования данных средства мониторинга дна, необходимы:

- модель донной обстановки, которая представляет собой совокупность взаимосвязанных моделей отдельных донных объектов, сформированных при помощи любого 3D-редактора;
- модель средства обследования дна, которая представляет собой совокупность заданных значений следующих характеристик: мощность акустического сигнала, разрешающая способность, количество отсчетов, ширина диаграммы направленности акустического луча в продольной, поперечной плоскостях.

Процесс имитации данных можно разбить на следующие основные этапы.

Этап 1. Расчет карты теней относительно положения центра масс средства обследования дна и направления его работы. Формирование карты теней относится к классической задаче, решаемой на графическом процессорном устройстве ГПУ [8];

Этап 2. Расчет акустического изображения донной поверхности относительно положения центра масс средства обследования дна и направления его работы с учетом рассчитанной карты теней. Формирование акустического изображения донной поверхности осуществляется ГПУ путем кодирования в цвет вычисленной силы цели для каждого точечного объекта донной поверхности;

Этап 3. Расчет карты дальностей элементов донной обстановки от положения центра масс средства обследования дна с учетом направления его работы. Дальность от центра масс до каждого элемента донной обстановки рассчитывается на ГПУ и кодируется цветом;

Этап 4. На основе полученных данных на этапах 2 и 3 формирование информационного массива, генерируемого средством обследования дна на каждом цикле излучения. Проводится декодирование цветов акустического изображения в массив сил цели точечных объектов и декодирование цветов карты дальностей в массив номеров отсчетов до каждого точечного объекта. Далее, в массив результатов работы средства в соответствии с номером отсчета записывается среднее значение всех сил цели соответствующих точечных объектов.

Результаты работы. Формирование обучающей выборки проводилось для объектов класса «трубопровод». Смоделированные сонограммы подвергались искусственному увеличению данных на основе уже имеющихся. В работе применялись техники смещения смоделированных объектов в пространстве и его масштабирования. Таким образом, была сформирована обучающая выборка из 3000 сонограмм, на которой проводилось обучение нейронной сети с параметрами (скорость обучения, количество эпох обучения, функция оптимизации обучения и т.д.), настроенными таким образом, чтобы ошибка распознавания имела постепенно убывающее значение, вероятность правильной классификации стремилась к 100%.

Для формирования тестовой выборки моделирование данных средства обнаружения проводилось в условиях различного типа зашумления в виде неровностей морского дна, тестовая выборка включала в себя данные с объектами, не относящимися к классу «трубопровод». Размер тестовой выборки составил 1000 объектов.

В результате были получены следующие оценки вероятностей правильного распознавания класса объекта:

- 94% вероятность правильной классификации;
- 3% на вероятность ложных тревог.

Заключение. Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- подтверждается работоспособность технологии моделирования выборки для обучения и тестирования нейронных сетей для распознавания донных объектов по данным установленных на АНПА средств мониторинга дна;
- полученные оценки вероятностей правильной классификации показывают, что описанную технологию необходимо совершенствовать.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

ЛИТЕРАТУРА

1. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение /А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк [отв. ред. Л.В. Киселев]. Владивосток: Дальнаука. 2018. 368 с.
2. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. М.: ДМК Пресс. 2017. 652 с.
3. Каплуненко Д.Д., Зотов С.С., Суботэ А.Е., Фищенко В.К. Применение нейронных сетей для классификации биологических объектов по подводным камерам МЭС острова Попова // Подводные исследования и робототехника. 2022. №1 (39). С 72-80.
4. Williams D.P., Hamon R., Gerg I.D. On the benefit of multiple representations with convolutional neural networks for improved target classification using sonar data // Proc. 5th underwater acoustics conference and exhibition (UACE2019). 2019. Crete, Greece. P.187-194.
5. Gerg I. and Williams D.. Additional representations for improving synthetic aperture sonar classification using convolutional neural networks // Proc. 4th Int. Conf. on SAS/SAR. 2018. V.40. P.11–22,

6. Williams D.. The mondrian detection algorithm for sonar imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2018. V.56(2). P.1091–1102.
7. Bykova V.S, Mashoshin A.I., Smirnov A.S. One approach to the recognition of bottom objects using monitoring systems installed on an autonomous underwater vehicle // International Russian Automation Conference(RusAutoCon).DOI:10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896273.
8. Joey de Vries Learn OpenGL – graphics programming, 2020. p. 523. ISBN: 978-90-90-33256-7.

V.S. Bykova, A.I. Mashoshin, A.A. Pavlov (Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg, Russia). **Problems in using neural networks for bottom object recognition**

Abstract. Application of neural networks to object recognition is always associated with the problem of training sample generation. The lack of training material is particularly relevant in processing the hydroacoustic and optical sea bottom survey data. The paper describes an approach consisting in generating the simulated data and provides the results of neural network operation on the test sample of noisy data.

И. В. УЛИТИН, М. А. БАРУЛИНА, С. В. ОКУНЬКОВ
(Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов,
Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь)

АНСАМБЛЕВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЧЕРНО-БЕЛЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПРЕДИКТИВНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Работа посвящена проблеме создания изображений-масок, необходимых для решения задачи сегментации изображений с помощью искусственного интеллекта. Были рассмотрены ансамбли из двух алгоритмов, результатом работы которых является маска входного изображения. Было показано, что комбинация операторов с алгоритмом MeanShift может быть применима для создания масок, но требует дальнейшей настройки и проверки на практике. Применение алгоритма заливки при решении данной проблемы также возможно, но требует разработки метода выбора начальных точек для выполнения алгоритма.

Введение. Предобработка изображений для последующего применения алгоритмов машинного и глубокого обучения в различных задачах классификации, сегментации и кластеризации является сложным процессом. Зачастую этот процесс занимает наибольшую часть времени относительно решения всей задачи – например, в работе [1] при решении задачи классификации специалист вручную осуществлял соотнесение изображений к тому или иному классу, таким образом формируя набор данных для обучения. В задаче сегментации изображений необходимо предварительно сформировать набор изображений-масок, где каждая маска содержит выделенный сегмент соответствующего этой маске изображения, что требует большого количества времени для её выполнения вручную. Кроме того, отсутствует универсальная методология, согласно которой осуществляется создание масок, что также усложняет процесс подготовки выборки. В работе рассматриваются алгоритмы выделения границ и техники анализа пространства признаков, применение которых в ансамбле может послужить формулированию методологии создания масок для выборок при решении задач сегментации черно-белых изображений. В качестве исходной выборки для применения ансамбля были взяты снимки со спутников.

Постановка задачи исследования. В работе осуществлен анализ различных ансамблей, каждый из которых состоит из алгоритма выделения границ и алгоритма анализа пространства признаков. Первый элемент ансамбля представляет собой оператор, выделяющий на изображении границы объектов, а второй элемент на основе выделенных границ осуществляет кластеризацию пикселей, деля их на подмножества. Результатом работы ансамбля является сегментированное изображение, которое может послужить маской для исходного. В данной работе рассматривались операторы Прюитт, Робертса и Собеля, а в качестве второй части ансамбля были использованы алгоритмы сдвига среднего значения (англ. Mean Shift) [2] и заливки (англ. Flood fill).

Операторы для выделения границ. В области обработки изображения и компьютерного зрения существует ряд алгоритмов, направленных на выделение объектов и их границ на цифровом изображении, пиксели которых характеризуются резким изменением яркости или другого параметра. Все рассмотренные методы основываются на одном из базовых свойств сигнала яркости – разрывности. Наиболее общим способом поиска разрывов является обработка изображения с помощью скользящего ядра, которое представляет собой некую квадратную матрицу, соответствующую указанной группе пикселей исходного изображения. Элементы матрицы принято называть коэффициентами.

Оператор Прюитт – это оператор дискретного дифференцирования, вычисляющий аппроксимацию градиента функции интенсивности изображения. В каждой точке изображения результатом оператора является либо соответствующий вектор градиента, либо норма этого вектора. Оператор использует два ядра 3×3 , свёртывая исходное изображение для вычисления приближённых значений производных – одно по горизонтали и одно по вертикали:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * A \quad G_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * A,$$

где A – исходное изображение, G_x – приближенные значения производных изображения по горизонтали, G_y – приближенные значения производных изображения по вертикали, $*$ – двумерная операция свёртки.

Перекрёстный оператор Робертса – один из ранних алгоритмов выделения границ, который вычисляет на плоском дискретном изображении сумму квадратов разниц между диагонально смежными пикселями. Это может быть выполнено сверткой изображения с двумя ядрами. Новое изображение получается следующим образом:

$$G = \sqrt{\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} * A \right)^2 + \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} * A \right)^2}.$$

Оператор Собеля – дискретный дифференциальный оператор, вычисляющий приближённое значение градиента яркости изображения. В каждой точке изображения приближённое значение величины градиента можно вычислить путём использования полученных приближенных значений производных:

$$G = \sqrt{\left(\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A \right)^2 + \left(\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * A \right)^2}.$$

Алгоритмы анализа пространства признаков. После применения одного из приведенных выше операторов, применялся один из двух способов обработки изображений: алгоритм сдвига среднего значения или алгоритм заливки.

Алгоритм сдвига среднего значения определяет расположения максимальных значений плотности вероятности, задаваемой дискретной выборкой по этой функции. Взвешенное среднее плотности в окне относительно точки x , определённом некоторой ядерной (оконой) функцией, равно:

$$m(x) = \frac{\sum_{x_i \in N(x)} K(x_i - x) x_i}{\sum_{x_i \in N(x)} K(x_i - x)},$$

где: $N(x)$ – набор точек, являющихся окрестностью точки x , для которых $K(x_i) \neq 0$.

Алгоритм заливки позволяет выделить однородные по цвету множества точек. Для этого необходимо сделать выбор начального пикселя и установить интервал изменения цвета соседних пикселей относительно исходного (некоторое пороговое значение разницы между яркостями соседнего и исходного пикселей, меньше которого соседний пиксель окрашивается в цвет исходного).

Ансамбли. Комбинируя между собой различные операторы и MeanShift, были получены изображения, представленные на рисунке ниже.

I.V.Ulitin, M.A.Barulina, S.V.Okunkov (Institute for Precision Mechanics and Control Problems, Saratov, Saratov, National Research State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Perm State University, Perm). **Ensemble methods for processing black and white images for predictive navigation systems**

Abstract. This work is devoted to the problem of creating mask images which is necessary for solving the problem of image segmentation using artificial intelligence. Ensembles of two algorithms were considered, the result of which is a mask for the input image. It has been shown that a combination of operators with the MeanShift algorithm can be used to create masks, but requires further tweaking and testing in practice. The application of the Flood fill algorithm in solving this problem is also possible, but it requires the development of a method for selecting starting points for the algorithm to be executed.