



КИТАЙСКОЕ ОБЩЕСТВО ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. ПЕТРА ВЕЛИКОГО



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО



МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ «АКАДЕМИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ»

МЕЖДУНАРОДНЫЙ МОЛОДЕЖНЫЙ СЕМИНАР
'NAVIGATION AND CONTROL' 2024

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

12–15 ДЕКАБРЯ 2024 г.

СБОРНИК ПРЕПРИНТОВ
НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

Китай, Нанкин
2024

Настоящий сборник содержит предварительные версии докладов, поданных на русском языке, для представления на Международном молодежном семинаре «Навигация и управление» (12–15 декабря 2024 года, г.Нанкин, Китай), организованном при поддержке Китайского общества инерциальных технологий, Санкт-Петербургского отделения РАН, Университета ИТМО, международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Тексты публикуются в авторской редакции. Обращаем ваше внимание: материалы предоставляются исключительно для ознакомления и не предназначены для цитирования.

По результатам семинара финальная версия сборника будет размещена в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Сопредседатели программного комитета:

Ван Вэй, академик Китайской академии наук, руководитель Китайского общества инерциальных технологий

В.Г. Пешехонов, академик РАН, президент международной общественной организации «Академия навигации и управления движением»

Члены программного комитета, представляющие Российскую Федерацию:

чл.-корр. РАН О.А. Степанов – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО

к.т.н. Ю.А. Литвиненко – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО

чл.-корр. РАН Д.Г. Арсеньев – Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого

проф. И.В. Белоконов – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

проф. А.А. Голован – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

проф. О.Н. Граничин – Санкт-Петербургский государственный университет

чл.-корр. РАН Н.В. Кузнецов – Санкт-Петербургский государственный университет

проф. В.О. Никифоров – Университет ИТМО

проф. А.Л. Ронжин – Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН

© АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия, 2024

© Международная общественная организация «Академия навигации и управления движением», Санкт-Петербург, Россия, 2024

Международный молодёжный семинар «Навигация и управление» 12-15 декабря 2024, Нанкин, Китай

1. **А.А. Голован, В.С. Вязьмин**

Современное состояние бескарданной аэрогравиметрии методика постобработки первичных данных

2. **А.С. Эспиноза Валлес, И.В. Белоконов, И.А. Ломака, П.Н. Николаев**

Технология восстановления углового движения наноспутника по магнитометрическим измерениям на примере SamSat-ION

3. **Е.В. Барина, И.В. Белоконов, И.А. Тимбай**

Проблемы углового движения наноспутников формата CubeSat 6U на низких околоземных орбитах

4. **А.В. Козлов, Ф.С. Капралов, Г.О. Баранцев, С.А. Фёдоров**

Полный цикл калибровки бескарданных инерциальных навигационных систем в сборе

5. **Ф.С. Капралов**

Современная точность определения ориентации с помощью многоантенной спутниковой навигационной системы

6. **И.А. Акимов**

Подход к оцениванию вектора возмущения силы тяжести по повторным аэрогравиметрическим измерениям

7. **Е.В. Шестакова**

Определение сбоев в избыточном блоке чувствительных элементов

8. **И.С. Архипов**

Мультиагентная операционная система реального времени для совместного управления роботами

9. **П.С. Михайлов, В.Н. Конешов, В.Н. Соловьев**

Оценки точности современных глобальных моделей гравитационного поля Земли и опыт их использования при выполнении морских гравиметрических съемок

10. **А.Р. Браженко, А.О. Комаров**

Алгоритм локализации и определения направления воздействия угроз с использованием визуально-языковых моделей в автопилотируемых транспортных системах

11. **А.О. Комаров, А.Р. Браженко**

Алгоритм построения сцены для визуализации препятствий по двум камерам

12. **Т.О. Бергер, И.А. Ломака**

Выбор параметров магнитных систем ориентации и стабилизации малоразмерных космических аппаратов на солнечно-синхронных орбитах

13. **М.П. Злыгостева, А.П. Колеватов, Т.А. Ульяновская, А.М. Сергеев, Ю.В. Ившина**

Идентификация моделей теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа

- 14. М.М. Мурзабеков, Д.С. Бобров, В.П. Лопатин, Е.С. Скворцов**
Полевой геофизический комплекс для создания навигационных грави-магнитных карт для систем автономной навигации
- 15. Д. Г. Арсеньев, А. Е. Мисник, М.А. Шалухова**
Управление реабилитацией пациентов в медицинских киберфизических системах
- 16. Е.В. Лукоянов, Е.В. Драницына**
Сравнение алгоритмов повышения отказоустойчивости комплексов с резервированными бесплатформенными инерциальными навигационными системами
- 17. Ю.А. Литвиненко, О.А. Степанов**
Особенности реализации методов федеративной фильтрации в нерекуррентных схемах обработки измерений
- 18. М.А. Пономарёва, А.В. Крамлих**
Определение ориентации космических аппаратов по одномоментным измерениям
- 19. М.А. Власова, А.Н. Шевченко, С.В. Ермак**
Оптимизация амплитуды радиочастотного поля при контроле параметров газовых ячеек различных типов квантовых датчиков
- 20. В.Г. Караулов, А.М. Грузликов, М.Д. Кораблева**
Решение задачи относительной навигации с использованием глубоких нейронных сетей
- 21. М.А. Сорвина**
Беспроводная реализация акселерометров на поверхностных акустических волнах
- 22. О.А. Степанов, Ю.А. Литвиненко, А.М. Исаев**
Рекуррентный итерационный сглаживающий пачечный линейризованный фильтр в задачах обработки навигационной информации
- 23. О.А. Степанов, Ю. А. Литвиненко, А. В. Моторин, А. М. Исаев**
Сравнение байесовских методов оценивания и методов оптимизации на графах
- 24. А.К. Голубев, А.А. Пыркин, В.М. Фомин**
Бездатчиковое управление асинхронным двигателем
- 25. В.А. Болотина, Д.П. Аваряскин**
Исследование влияния луны на инспекционное движение космических аппаратов на высоких орбитах
- 26. М.А. Тит, О.С. Юльметова, А.Г. Щербак**
Опыт разработки технологии изготовления прецизионных сферических узлов
- 27. В.В. Потехин, Е.В. Куклин, П.К. Смирнов**
Управление промышленными распределёнными системами на базе открытых информационных технологий
- 28. А.В. Брагин**
Оценивание дрейфов гироскопов по информации о нулевой скорости в задаче навигации пешехода

29. С.П. Аблясова

Моделирование траекторных параметров движения объекта в окрестности полюса с использованием квазигеографических координат

30. Д. И. Смольянов

Задача навигации беспилотной колесной сельскохозяйственной техники с использованием инерциальной, спутниковой информации и одометрии

31. М.А. Власова, В.В. Чалков

Разработка модульного стендов для проверки оптических ячеек квантовых датчиков на основе эталона

32. С.А. Федоров, Ф.С. Капралов

Сглаживающий фильтр для оценки нестабильного дрейфа микромеханического гироскопа в динамическом калибровочном эксперименте

33. Д.А. Сафин

Алгоритмические решения в задаче интеграции данных бескарданной инерциальной навигационной системы и одометра

34. В.Д. Сметанина

Выявление пространственно-временных кластеров в мультиагентных системах с помощью эндемической модели

35. Д.Р. Мингазов

Исследование методов консенсуса и управления с фиксированным временем для систем с множеством агентов

36. Д.О. Гаврилов, А.В. Ивлиев

Разработка исполнительного устройства магнитной системы ориентации наноспутника

37. В.О. Бондаренко

Разработка 6-осного роботизированного манипулятора для стереотаксической хирургии

А.А. ГОЛОВАН, В.С. ВЯЗЬМИН

(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕСКАРДАННОЙ АЭРОГРАВИМЕТРИИ. МЕТОДИКА ПОСТОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ

Аэрогравиметрия является разделом геофизики, изучающим методы измерения силы тяжести с борта летательного аппарата. В докладе обсуждается современное состояние аэрогравиметрии, методика и алгоритмы постобработки измерений бескарданного аэрогравиметра, включающего БИНС и приемники ГНСС.

Введение. В аэрогравиметрии требуется определить вертикальную компоненту вектора силы тяжести (аномалию) по измерениям аэрогравиметра на траектории полета летательного аппарата (самолета, вертолета). Традиционно для этой цели применяются аэрогравиметры, в состав которых входит гиросtabilизированная платформа (L&R, Чекан-АМ, GT-2А и др.) [1]. В докладе рассматриваются бескарданые аэрогравиметры, являющиеся альтернативой платформенным, которые включают бескарданую инерциальную навигационную систему (БИНС) и приемники глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [2-4]. Решение задачи определения аномалии проводится в постобработке и состоит из ряда этапов. В докладе обсуждаются основные задачи постобработки (задачи спутниковой навигации, начальной выставки БИНС, интеграции БИНС-ГНСС) и подходы к решению. Обсуждаются особенности алгоритмов разработанной методики постобработки первичных измерений бескарданного аэрогравиметра.

Методика постобработки данных бескарданного гравиметра. Задача постобработки ставится как задача определения аномалии силы тяжести $\Delta g = g - g_0$ (где g и g_0 – реальная и нормальная силы тяжести в проекции на географическую вертикаль) по измерениям инерциальных датчиков (акселерометров, гироскопов) БИНС гравиметра и приемников ГНСС (бортового и базового) на траектории полета. Разработанная методика постобработки первичных данных аэрогравиметра включает следующие основные этапы:

1. Экспресс-диагностика первичных данных (проверка целостности данных, сбоев, контроль температурных вариаций внутри аэрогравиметра и пр.).
2. Начальная выставка БИНС аэрогравиметра, совмещенная с калибровкой блока акселерометров (определение смещений нулевых сигналов).
3. Определение координат и скорости антенны бортового приемника ГНСС по первичным спутниковым измерениям в дифференциальном режиме.
4. Определение интегрированного решения БИНС-ГНСС.
5. Гравиметрические решения (оценка аномалии).

Кратко обсудим особенности решения основных задач постобработки. На этапе начальной выставки БИНС аэрогравиметра (этап 2) определяются углы ориентации корпуса БИНС на стоянке летательного аппарата, выполняется калибровка акселерометров (определяются смещения нулевых сигналов, поправки масштабных коэффициентов) [2]. Особенностью задачи являются неконтролируемые угловые движения корпуса БИНС, обусловленные влиянием работы экипажа, включением/выключением двигателей летательного аппарата, влиянием ветра на аэродроме.

На стадии интеграции БИНС-ГНСС (этап 4) определяются траекторные параметры аэрогравиметра, оценки параметров инструментальных погрешностей инерциальных датчиков БИНС. Математически задача сводится к задаче коррекции БИНС по данным ГНСС (координатам, скоростям) и основывается на уравнениях ошибок БИНС [1, 5]. Фазовый вектор уравнений ошибок включает следующие параметры:

- широта, долгота, высота чувствительной массы гравиметра;
- восточная и северная проекции относительной скорости БИНС;
- углы ориентации (курс, крен, тангаж) БИНС;
- смещения нулей акселерометров в запуске;
- дрейфы гироскопов в запуске;
- смещения антенны бортового приемника ГНСС относительно БИНС;

- погрешности синхронизации данных.

Известно, что задача интеграции при заданных моделях погрешностей измерений сводится к стандартной задаче стохастического оценивания и решается при помощи фильтра Калмана и сглаживания [6].

Решение гравиметрической задачи (этап 5) базируется на основном уравнении аэрогравиметрии [1] – уравнении движения чувствительной массы акселерометров БИНС, записанном в проекциях на оси географического трехгранника (направления осей – на восток, север, вверх по нормали к эллипсоиду). После подстановки измерений датчиков и ГНСС в основное уравнение задача аэрогравиметрии может быть сведена к задаче стохастического оценивания аномалии и остаточных погрешностей датчиков (остаточных угловых ошибок вертикали, параметров рас-синхронизации данных). Алгоритм решения – фильтр Калмана со сглаживанием.

Пример постобработки аэрогравиметрических измерений. На рис. 1 представлены результаты применения разработанной методики постобработки к данным бескарданного аэрогравиметра в тестовой аэрогеофизической съемке на самолете (2021 г.). На борту был также установлен платформенный аэрогравиметр. На рис. 1 слева приведены ошибки координат автономного инерциального счисления БИНС гравиметра (в качестве эталонных данных взяты данные ГНСС). Максимальная ошибка составила 3 км. На рис. 1 справа представлены оценки аномалии на траектории полета самолета по данным бескарданного и платформенного аэрогравиметров. Средне-квадратическое отклонение разности оценок аномалий составило 1.1 мГал, что свидетельствует о высокой сходимости результатов по двум гравиметрам. На рис. 1 также для сравнения приведены значения аномалии, рассчитанные по данным глобальной высокостепенной модели гравитационного поля XGM2019 [7]. Можно отметить существенно более низкое пространственное разрешение глобальной модели при сопоставлении с данными аэрогравиметров.

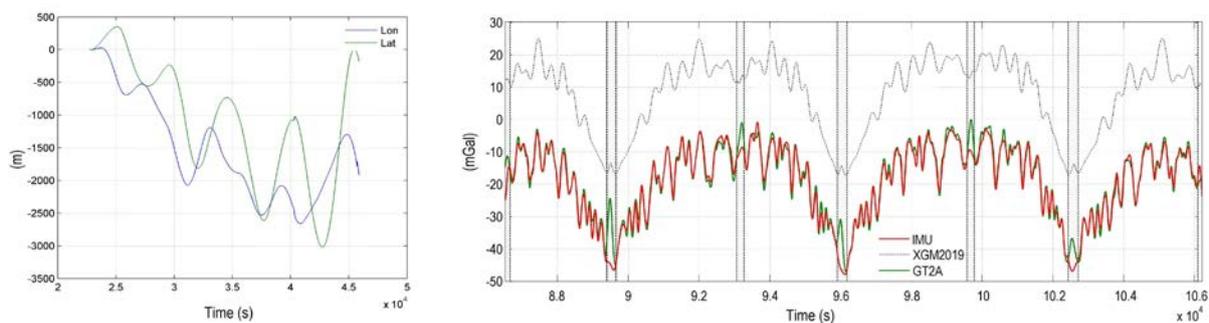


Рис. 1. Слева: ошибки инерциального счисления БИНС бескарданного аэрогравиметра (слева). Справа: оценки аномалии по данным бескарданного (красн.) и платформенного аэрогравиметров (зелен.); данные глобальной модели потенциала (черн.), мГал.

Заключение. В современной аэрогравиметрии трендом является применение бескарданных аэрогравиметров вместо традиционных платформенных комплексов. В докладе обсуждаются особенности методики постобработки первичных данных бескарданных аэрогравиметров и приводится пример обработки измерений, полученных в ходе тестовой съемки с бескарданным аэрогравиметром.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Современные методы и средства** измерения параметров гравитационного поля Земли. Под общ. ред. Пешехонова В.Г., науч. ред. Степанова О.А. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ Электронприбор», 2017. 390 с.
2. **Golovan A.A., Vyazmin V.S.** Methodology of Airborne Gravimetry Surveying and Strapdown Gravimeter Data Processing, Gyroscopy and Navigation, 2023, vol. 14, no. 1, pp. 36-47.
3. **Cai S., Zhang K., Wu M., Huang Y.** The method on acceleration extraction from strapdown airborne scalar gravimeter based on flight dynamics. Adv. Mater. Res. 2012. P. 2152–2156.
4. **Senobari M.S.** New results in airborne vector gravimetry using strapdown INS/DGPS. J. Geod. 2010. V. 84: P. 277–291.
5. **Jekeli C.** Inertial navigation systems with geodetic applications. Walter de Gruyter, New York. 2001.
6. **Kailath T., Sayed A.H., Hassibi B.** Linear Estimation. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2000. 854p.
7. **Zingerle P., Pail R., Gruber T., Oikonomidou X.** The combined global gravity field model XGM2019e. J. Geod. 2020. V. 94. P. 1-12

A.A. Golovan, V.S. Vyazmin (Lomonosov Moscow State University, Moscow). **Current state of strapdown airborne gravimetry. Methodology of gravimeter data postprocessing**

Abstract. Airborne gravimetry is a branch of geophysics that studies methods of measuring gravity on board an aircraft. The paper discusses the current state of airborne gravimetry, the methodology and algorithms of postprocessing raw measurements from a strapdown gravimeter based on strapdown INS and GNSS receivers.

А. С. ЭСПИНОЗА ВАЛЛЕС, И. В. БЕЛОКОНОВ, И. А. ЛОМАКА, П. Н. НИКОЛАЕВ
(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара)

ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ НАНОСПУТНИКА ПО МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ПРИМЕРЕ SAMSAT-ION

В работе предложена методика восстановления углового движения наноспутника с использованием магнитометрических измерений. Основная идея методики основана на использовании измерений магнитного поля Земли для приближенной оценки кватернионов ориентации и угловых скоростей наноспутника. Применение предложенного метода позволило восстановить угловое движение наноспутника SamSat-ION во время летно-конструкторских испытаний.

Введение. Восстановление углового движения космических аппаратов имеет решающее значение для обеспечения их функциональности, в частности при выполнении задач научного наблюдения и связи. Предложен ряд подходов к восстановлению ориентации с использованием данных токосъема солнечных батарей, солнечных датчиков [1, 2]. Использование магнитометра для оценки ориентации во время полета особенно актуально для малоразмерных космических аппаратов с ограниченными энергетическими и вычислительными возможностями, что подтверждается рядом исследований [3, 4]. Настоящая работа посвящена технологии восстановления углового движения наноспутника, основанной на магнитометрических измерениях. В результате работы восстановлено угловое движение SamSat-ION во время всех сеансов связи с наноспутником.

Методика восстановления углового движения наноспутника. Характер углового движения наноспутника может быть приближенно восстановлен с использованием направления вектора локального магнитного поля, измеренного бортовым магнитометром. Задачу восстановления углового движения можно разделить на два этапа. На первом этапе проводится предварительная корректировка показаний магнитометра, а на втором – оценка параметров ориентации: начальных условий кватерниона и угловой скорости.

Поправки ошибок измерений магнитометра. Перед использованием магнитометрических измерений для оценки углового движения необходимо устранить погрешности измерений магнитометра, выраженные в виде вектора смещения нуля \mathbf{b}_{mag} . Для оценки смещения сводится к минимуму разница между модулем вектора магнитометрических измерений с вычетом смещения нуля и модулем вектора соответствующих им расчетных измерений. Расчетные измерения магнитного поля вычисляются согласно модели IGRF-13, соответствующие траектории орбитального полета. Орбитальное движение оценивается по модели SGP4 исходя из TLE-файлов, доступных для рассматриваемого наноспутника.

Оценка начальных условий углового движения. Необходимо привязывать расчетные измерения магнитного поля к ориентации наноспутника. По отыскиваемым начальным условиям угловое движения прогнозируется согласно динамическими уравнениями Эйлера и кинематическими уравнениями. Расчетные измерения переводятся в связанную с наноспутником систему координат (ССК) с помощью матрицы перехода, составленной из спрогнозированных кватернионов. С учетом найденного вектора смещения нуля магнитометра оцениваются начальные условия углового движения наноспутника, минимизируя следующую целевую функцию:

$$\Phi(\mathbf{q}_0, \boldsymbol{\omega}_0) = \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{(\mathbf{V}_{meas_i} - \hat{\mathbf{b}}_{mag}) \cdot \mathbf{V}_{ref_i}(\mathbf{q}_0, \boldsymbol{\omega}_0)}{\|\mathbf{V}_{meas_i} - \hat{\mathbf{b}}_{mag}\| \|\mathbf{V}_{ref_i}(\mathbf{q}_0, \boldsymbol{\omega}_0)\|} \right) \rightarrow \min_{\mathbf{q}_0, \boldsymbol{\omega}_0} \quad (1)$$

где \mathbf{q}_0 , $\boldsymbol{\omega}_0$ – начальные условия вектора кватерниона ориентации и вектора угловой скорости; \mathbf{V}_{meas} – измерения бортового магнитометра; $\hat{\mathbf{b}}_{mag}$ – вектор смещения нуля магнитометра;

\mathbf{V}_{ref} – вектор расчетных измерений магнитометра в ССК; N – количество измерений, доступных в сеансе связи.

Поиск оптимального решения целевой функции (1) может осуществляться, например, методом дифференциальной эволюции, который обладает высокой степенью сходимости.

Применение методики для восстановления углового движения наноспутника SamSat-ION. SamSat-ION – это наноспутник формата CubeSat 3U, разработанный на базе Самарского университета и запущенный в июне 2023 года для исследований магнитосферы и ионосферы Земли. Система управления движением SamSat-ION основывается на активной магнитной стабилизации и содержит ряд измерительных средств, включая магнитометры MMC5883, датчики угловой скорости (ДУС) MPU-9255, ADXRS290 и датчики освещенности TCS3472. Предложенная методика применена для восстановления относительного движения наноспутника SamSat-ION по научной телеметрии, полученной в ходе летно-конструкторских испытаний. В результаты оценены начальные условия кватерниона ориентации и угловой скорости для всех сеансов связи. На рис. 1 приведены результаты оценки ориентации в виде согласования измерений магнитометра с расчетными. На рис. 2 приведены результаты оценки абсолютной угловой скорости в виде согласования измерений ДУС с восстановленной угловой скоростью.

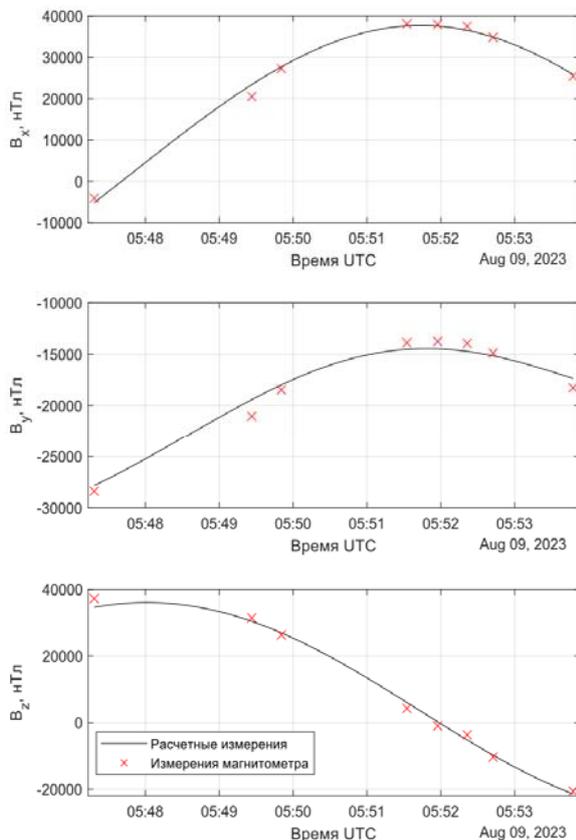


Рис. 1. Оценка ориентации (согласование измерений магнитометра)

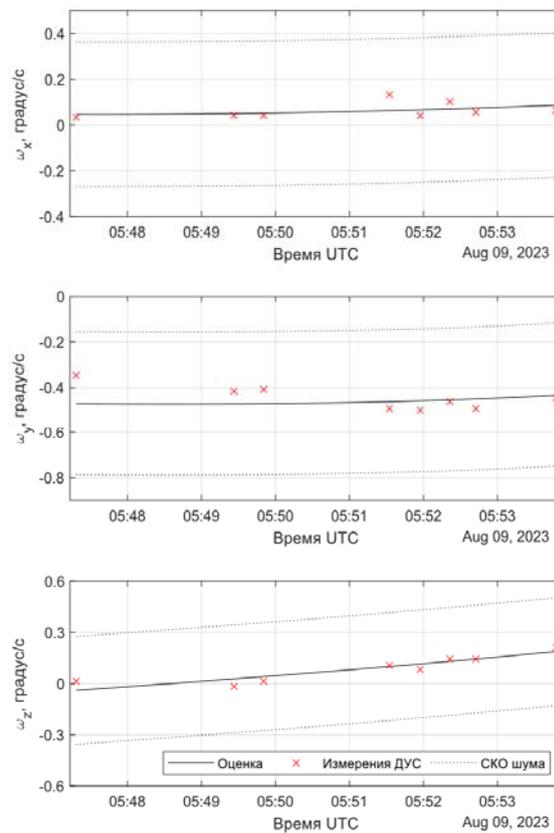


Рис. 2. Оценка угловой скорости (согласование измерений ДУС)

Как видно из графиков, измерения датчиков хорошо согласуются с расчетными. Так как расчетные измерения датчиков непосредственно связаны с ориентацией наноспутника, можно прийти к тому, что, угловое движение восстановлено с большой точностью. Модуль угловой скорости SamSat-ION при этом находился в диапазоне 0,41-0,55 градус/с во всех рассматриваемых сеансах связи.

Закключение. В работе представлен подход к восстановлению углового движения наноспутника на основе магнитометрических измерений. На основе предложенного подхода восстановлено угловое движение наноспутника SamSat-ION во время летно-конструкторских испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Belokonov I.V., Kramlikh A.V., Lomaka I.A., Nikolaev P.N.** Reconstruction of a Spacecraft's Attitude Motion Using the Data on the Current Collected from Solar Panels. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2019. Vol. 58. № 2. P. 286–296.
2. **Belokonov I.V., Lomaka I.A.** Postflight Recovery of the Rotational Motion of a Small Space Vehicle from Solar Sensor Information. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2023. Vol. 62. № 2. P. 214–224.
3. **Ivanov D.S. et al.** The results of flight tests of an attitude control system for the Chibis-M microsatellite. *Cosmic Research*. 2014. Vol. 52. № 3. P. 205–215.
4. **Ivanov D.S. et al.** Angular Motion of the TNS-0 # 2 Nanosatellite after Launch from the International Space Station. *Cosmic Research*. 2019. Vol. 57. №. 4. P. 272–288.

A.S. Espinoza Valles, I.V. Belokonov, I.A. Lomaka, P.N. Nikolaev, (Samara National Research University, Samara). **Method for the Reconstruction of Nanosatellite Angular Motion Based on Magnetometer Measurements: A Case Study of SamSat-ION**

Abstract. This study presents a method for reconstructing the angular motion of a nanosatellite using magnetometry measurements. The core concept of the method is based on using Earth's magnetic field measurements for approximate estimation of orientation quaternions and angular velocities of the nanosatellite. The application of the proposed method made it possible to reconstruct the angular motion of the SamSat-ION nanosatellite during flight tests.

Е. В. БАРИНОВА, И. В. БЕЛОКОНОВ, И. А. ТИМБАЙ

(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара)

ПРОБЛЕМЫ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ НАНОСПУТНИКОВ ФОРМАТА CUBESAT 6U НА НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ

Исследуется пассивное угловое движение наноспутников формата CubeSat 6U относительно центра масс на низких круговых орбитах под действием аэродинамического и гравитационного моментов с учётом особенностей математической модели аэродинамической силы лобового сопротивления. Получена система уравнений для определения положений равновесия наноспутника. Показана возможность возникновения резонансных режимов движения.

Введение. При выполнении ряда целевых задач необходимо поддерживать определённую ориентацию наноспутника (НС), при этом с целью снижения энергетических затрат предпочтительнее отдаётся пассивным или комбинированным системам стабилизации. При проектировании пассивных систем стабилизации используется информация об устойчивых положениях равновесия под действием внешних моментов и анализ неуправляемого движения НС относительно центра масс. Поэтому важной задачей является определение положений равновесия, а также изучение движения НС в их окрестности под действием гравитационного и аэродинамического моментов, которые являются преобладающими на низких круговых орбитах. Поскольку НС формата CubeSat имеют форму прямоугольного параллелепипеда, что влечёт за собой изменения в математической модели аэродинамической силы лобового сопротивления, то возникает новый класс задач, связанный с поиском положений равновесия и исследованием возможности возникновения резонансных режимов движения.

Ранее авторами была получена система уравнений для определения положений равновесия углового движения НС формата CubeSat 1U–3U на круговой орбите под действием аэродинамического и гравитационного моментов и найдено её аналитическое решение для двух частных случаев [2, 3]. В развитие проведённых ранее исследований в данной работе проведён анализ динамики наноспутников формата CubeSat 6U. Получена система для определения положений равновесия в орбитальной системе координат под действием аэродинамического и гравитационного моментов. Для частного случая смещения центра давления от центра масс по одной из главных осей инерции получены аналитические выражения. Для случая использования аэродинамической стабилизации по вектору скорости движения центра масс показана возможность возникновения резонансных режимов движения и даны рекомендации по их предотвращению.

Пассивное угловое движение наноспутников формата CubeSat 6U относительно центра масс под действием аэродинамического и гравитационного моментов. Для ориентации связанной с НС системы координат относительно траекторной используются углы Эйлера: α – пространственный угол атаки, ψ – угол прецессии, φ – угол собственного вращения.

На рассматриваемых высотах движения принято считать, что обтекание наноспутника является свободномолекулярным и удар молекул газа абсолютно неупругий. В этом случае аэродинамическая сила представляет собой силу сопротивления, которая определяется площадью проекции НС на плоскость, перпендикулярную вектору скорости набегающего потока [1]. В отличие от НС формата CubeSat 1U–3U, у НС CubeSat 6U различаются все три линейных размера ($l_x > l_z > l_y$), а, следовательно, отличается и выражение для площади проекции НС на плоскость, перпендикулярную вектору скорости набегающего потока:

$$S_x \cdot \tilde{S}(\alpha_n, \varphi) = S_x \cdot \left(|\cos \alpha_n| + \sin \alpha_n \left(\frac{l_x}{l_y} |\sin \varphi| + \frac{l_x}{l_z} |\cos \varphi| \right) \right), \quad (1)$$

где $S_x = l_y l_z$ – характерная площадь НС (в данном случае площадь наименьшей грани).

Уравнения пространственного движения НС относительно центра масс под действием аэродинамического и гравитационного моментов на круговой орбите можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega} = \mathbf{M}_a + \mathbf{M}_g, \quad (2)$$

где \mathbf{I} – тензор инерции НС; $\boldsymbol{\omega}$ – вектор абсолютной угловой скорости НС; \mathbf{M}_a – аэродинамический момент; \mathbf{M}_g – гравитационный момент.

Положения равновесия НС формата CubeSat 6U под действием аэродинамического и гравитационного моментов. В работах [2, 3] определены положения равновесия углового движения динамически симметричного наноспутника формата CubeSat 1U – 3U на круговой орбите под действием аэродинамического и гравитационного моментов для двух частных случаев: смещения центра давления динамически симметричного НС от его центра масс по трём координатам; смещения центра давления НС с тремя разными главными моментами инерции от его центра масс по одной из главных осей инерции.

В данной работе получена система уравнений для определения положений равновесия наноспутника формата CubeSat 6U под действием аэродинамического и гравитационного моментов с учётом особенностей для модели аэродинамического момента. Также найдено её аналитическое решение для частного случая смещения центра давления НС формата CubeSat 6U с тремя разными главными моментами инерции от его центра масс по одной из главных осей инерции.

Резонансные режимы движения. При использовании одноосной аэродинамической стабилизации продольной оси НС относительно вектора скорости, необходимо учитывать возможность возникновения резонансных режимов движения. Резонансные режимы движения проявляются в резком изменении амплитуды колебаний по пространственному углу атаки. В работе проводится изучение резонансных режимов движения в соответствии с алгоритмом изложенном в [4] с учётом отличий, обусловленных особенностями формата 6U. Выяснено, что по сравнению со случаем CubeSat 1U-3U [4], у НС CubeSat 6U большее количество резонансных соотношений частот порождается исключительно формой наноспутника. Для случая «прямой» прецессии 7 соотношений по сравнению с 5, для случая «обратной» - 3 соотношения по сравнению с 1. Кроме того, получены соотношения для определения критических значений продольной угловой скорости НС, при которых выполняются условия возникновения резонансных режимов движения.

Заключение. Приведённые в работе результаты могут быть полезны разработчикам наноспутников формата CubeSat 6U, которые продолжают набирать популярность в настоящее время.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Белецкий В.В.** Движение искусственного спутника относительно центра масс. Москва: Наука, 1965. 416 с.
2. **Барина Е.В., Тимбай И.А.** Положения относительного равновесия динамически симметричного наноспутника формата CubeSat под действием гравитационного и аэродинамического моментов. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2019. Т. 18. № 2. С. 21-32.
3. **Barinova E.V., Timbai I.A.** Determining of Equilibrium Positions of CubeSat Nanosatellite under the Influence of Aerodynamic and Gravitational Moments. in *27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. ICINS 2020. Proceedings. 2020*.
4. **Barinova E.V., Belokonov I.V., Timbai I.A.** Preventing Resonant Motion Modes for Low-Altitude CubeSat Nanosatellites. *Gyroscopy and Navigation*. 2021. Vol. 12. № 4. pp. 350–362.

E.V. Barinova, I.V. Belokonov, I.A. Timbai (Samara National Research University, Samara). **Problems of angular motion of the 6U CubeSat nanosatellites in low Earth orbits**

Abstract. This paper study the passive angular motion of the 6U CubeSat nanosatellites relative to its center of mass in low circular orbits under the influence of aerodynamic and gravitational moments, taking into account the features of the mathematical model of the aerodynamic drag force. A system of equations for determination of the nanosatellite equilibrium positions is obtained. It is shown the possibility of the occurrence of resonant motion modes.

А. В. КОЗЛОВ, Ф. С. КАПРАЛОВ, Г. О. БАРАНЦЕВ, С. А. ФЁДОРОВ
(Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва)

ПОЛНЫЙ ЦИКЛ КАЛИБРОВКИ БЕСКАРДАННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В СБОРЕ

Доклад посвящён обзору широкого набора источников погрешностей инерциальных датчиков и соответствующих им калибровочных процедур, составляющим вместе полный цикл калибровки вновь разрабатываемых инерциальных навигационных систем. Рассмотрены стандартные погрешности, рассинхронизация показаний, разнесение чувствительных масс акселерометров, юстировочные параметры, упругие деформации осей чувствительности и другие. Приводятся численные оценки вызванных ими навигационных ошибок.

Введение. Большинство публикаций и докладов о калибровке бескарданных инерциальных навигационных систем (БИНС), посвящаются отдельным методикам оценки смещений нулевых сигналов, масштабных коэффициентов и неортогональности осей чувствительности инерциальных датчиков — датчиков угловой скорости (гироскопов) и датчиков удельной силы, приложенной к чувствительной массе (ньютонметров/акселерометров). При этом остальные источники погрешностей считаются уже скомпенсированными. Действительно, перечисленные параметры необходимо оценивать для каждого экземпляра системы отдельно, и от точности их оценок существенно зависят ошибки навигационного решения [1]. Однако набор калибровочных параметров и проверочных экспериментов, направленных на установление соответствия погрешностей инерциальных датчиков принятым для них моделям, особенно для вновь разрабатываемых систем, оказывается гораздо обширнее. Доклад посвящён обзору более полного набора источников навигационных ошибок, основанному на последнем опыте разработки и калибровки целого ряда навигационных систем — от микромеханического гирокомпаса и БИНС различного применения до гравиметров. Рассмотренные в докладе методики, а также их сочетания, позволяющие сократить общую продолжительность калибровки, разработаны авторами. Рассматривается также взаимное влияние одних погрешностей на возможность оценки параметров других, естественным образом встречающееся на практике при работе с неполностью калиброванными БИНС в процессе разработки и производства. Приводятся количественные соотношения и примеры.

Типы погрешностей. Разделим здесь источники погрешностей измерений инерциальных датчиков на следующие классы, различающиеся видами и объёмом калибровочных процедур:

- параметры, одинаковые для БИНС одного типа;
- параметры модели погрешностей, индивидуальные для каждого экземпляра БИНС;
- температурные зависимости;
- параметры калибровочного эксперимента.

Далее рассмотрим эти классы по отдельности.

Параметры, одинаковые для БИНС одного типа. Следующие погрешности, как правило, калибруются (или контролируются) один раз для БИНС одного типа в процессе разработки:

- рассинхронизация гироскопических трактов;
- рассинхронизация между гироскопической и акселерометрической информацией;
- разнесения чувствительных масс ньютонметров.

Важность синхронизации гироскопических трактов иногда упускается при разработке. Однако, например, для гармонических колебаний вокруг биссектрисы двух приборных осей каждая микросекунда постоянной рассинхронизации между показаниями соответствующих датчиков угловой скорости при амплитуде 90° и периоде 5 с (активное маневрирование), или при амплитуде $3'$ и частоте 320 Гц (вибрации) приводит к среднему дрейфу ориентации по ортогональной оси около $0.15^\circ/\text{ч}$, что неприемлемо для БИНС навигационного класса точности. Для оценки величины рассинхронизации, в [2] авторами предложен специальный эксперимент. Методика построена таким образом, чтобы не зависеть от остаточных погрешностей калибровки инерциальных датчиков другого происхождения.

Рассинхронизация измерений блоков гироскопов и ньютонометров не так существенна в режиме навигации, однако, как выяснилось в гравиметрических полётах с так называемым «облётотом рельефа», она существенно влияет на оценку гравитационных аномалий. Параметры рассинхронизации данного типа могут быть отделены от других погрешностей в динамическом калибровочном эксперименте, упомянутом ниже.

Разнесение чувствительных масс ньютонометров хорошо исследовано в литературе. Однако, например, в гравиметрии требуемая точность компенсации разнесения имеет величину в пределах 1 мм (см. методику [3]), что требует специальных методик оценки.

Параметры, индивидуальные для каждого экземпляра БИНС. Погрешности, оценка параметров модели которых требуется для каждой системы отдельно, разделим на такие группы:

- погрешности сервисной электроники;
- юстировочные параметры;
- стандартная модель погрешностей инерциальных датчиков;
- расширенные модели погрешностей: упругие деформации осей чувствительности и др.

Погрешности сервисной электроники иногда компенсируются при помощи так называемой «автокалибровки» в реальном времени, а иногда для их компенсации требуются отдельные калибровочные процедуры.

Юстировочные параметры отвечают за привязку приборной системы координат инерциальных датчиков к корпусу БЧЭ или БИНС [4]. Тройка юстировочных углов определяет конечный поворот (возможно, малый). Этот поворот может быть постоянным (как правило) или переменным. Например, если суммарные коэффициенты крутильной упругости имеют величину более $0.5'/g$, при перегрузке в $6g$ ошибки юстировки выходят за требуемую границу в $3'$.

Калибровка смещений нулевых сигналов, ошибок масштабных коэффициентов и неортогональностей осей чувствительности достаточно хорошо освещена в литературе (хотя, как правило, в изоляции от остальных источников погрешностей). Наличие этих погрешностей должно учитываться в любой калибровочной процедуре. Рассматриваются две методики калибровки как параметров стандартной модели погрешностей, так и других параметров — статическая и динамическая [5].

Расширенные модели погрешностей инерциальных датчиков включают нелинейные слагаемые. Они должны быть малы настолько, чтобы можно было пренебречь мультипликативными шумовыми погрешностями при их компенсации. Отделимость соответствующих им параметров в задачах оценивания от других величин, как правило, плохо изучена. К известным погрешностям такого типа относятся динамические дрейфы механических гироскопов, нелинейности характеристик датчиков (несимметричность масштабов) и упругие деформации осей чувствительности. Их калибровка может быть включена в упомянутые выше методики калибровки стандартной модели погрешностей (см. [6]).

Температурные зависимости. Традиционный подход к их калибровке заключается в проведении экспериментов в температурных точках после установления температурного равновесия. Как показано в [7], коэффициенты зависимости от температуры могут оцениваться и наряду с остальными параметрами при переменной температуре. Для микромеханических датчиков известны случаи зависимостей показаний также и от профиля изменения температуры.

Параметры калибровочного эксперимента. Встречаются величины, которые не входят в погрешности датчиков, но могут исказить оценки искомых параметров. К ним относятся:

- уклонение осей поворотного стенда от линии отвеса и ошибка их привязки в азимуте;
- отнесение измерительного центра БИНС от центра вращения поворотного стенда [8];
- параметры системы амортизации БЧЭ, описанные выше при рассмотрении юстировки.

Для них не обязательно обеспечение полной наблюдаемости, однако их учёт в моделях измерений и отделение от искомых величин являются обязательными.

Заключение. Рассмотрен расширенный перечень источников погрешностей БИНС, которым можно руководствоваться при разработке и испытаниях инерциальных систем. Описаны типичные случаи их проявления, а также методики калибровки и контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kuznetsov A., Molchanov A., Fomichev A., Zheleznov V., Kozlov A.** On Guaranteeing Tolerances for Strapdown INS Instrumental Errors. *30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, Saint Petersburg, Russia, 2023, pp. 1-6. DOI: 10.23919/ICINS51816.2023.10168385.
2. **Kozlov A., Kapralov F., Fomichev A.** Calibration of a Timing Skew between Gyroscope Measurements in a Strapdown Inertial Navigation System. *26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, St. Petersburg, Russia, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.23919/ICINS.2019.8769417.
3. **Kozlov A., Kapralov F.** Millimeter-level calibration of IMU size effect and its compensation in navigation grade systems. *2019 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, Braunschweig, Germany, 2019, pp. 1-12. DOI: 10.1109/ISS46986.2019.8943630.
4. **Kozlov A.; Kapralov F.** Angular Misalignment Calibration for Dual-Antenna GNSS/IMU Navigation Sensor. *Sensors* 2023, 23, 77. DOI: 10.3390/s23010077.
5. **Vavilova N., Vasineva I., Golovan A., Kozlov A., Papusha I., Parusnikov N.** The Calibration Problem in Inertial Navigation. *Journal of Mathematical Sciences*, 253. DOI: 10.1007/s10958-021-05272-y.
6. **Barantsev G., Kozlov A., Shaimardanov I., Nekrasov A.** A Model of the Elastic Dynamic Torsion of a Ring Laser Gyroscope Mechanical Dither and a Method for its Calibration. *29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 1-4. DOI: 10.23919/ICINS51784.2022.9815435.
7. **Kozlov A., Tarygin I., Golovan A., Shaymardanov I., Dzuev A.** Calibration of an inertial measurement unit at changing temperature with simultaneous estimation of temperature variation coefficients: A case study on BINS-RT. *24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 1-3. DOI: 10.23919/ICINS.2017.7995635.
8. **Kozlov A., Sazonov I., Vavilova, N.** IMU calibration on a low grade turntable: Embedded estimation of the instrument displacement from the axis of rotation. *2014 International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, Laguna Beach, CA, USA, 2014, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ISS.2014.6782525.

A.V. Kozlov, F.S. Kapralov, G.O. Barantsev, S.A. Fedorov (Lomonosov Moscow State University, Moscow). **Complete calibration cycle for assembled strapdown inertial navigation systems**

Abstract. The report provides an extended list of error sources of inertial sensors and their corresponding calibration procedures. Altogether, they constitute a complete calibration cycle, which every navigation system should undergo through its development and production. We discuss standard sensor error model, as well as their timing skew, size effect, angular misalignment, elastic deformations of axes of sensitivity, and other parameters. Quantitative assessment of the produced navigation errors allows one to evaluate whether particular effects should be addressed when developing a new system and its calibration methods.

Ф. С. КАПРАЛОВ

(Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва)

СОВРЕМЕННАЯ ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МНОГОАНТЕННОЙ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Доклад посвящён анализу точности определения ориентации по позиционным спутниковым измерениям от многоантенной навигационной системы. Представлены результаты обработки реального эксперимента с пятью спутниковыми антеннами, расположенными в пределах одного метра друг от друга. Получена эталонная ориентация с точностью в несколько раз большей, чем современная характерная точность определения ориентации с помощью многоантенной спутниковой системы, что позволило провести анализ ошибок углов ориентации.

Введение. Рассматривается задача определения ориентации объекта с точностью порядка первых десятых долей градуса. Хорошо известно, что с указанной точностью задача может быть решена с помощью высокоточной бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС) навигационного класса точности. Однако, ввиду характерных размеров, массы, потребляемой мощности и стоимости БИНС её применение не всегда целесообразно и возможно в ряде приложений. Одним из альтернативных наборов датчиков для определения углов ориентации с точностью порядка 0.1° , который лишён недостатков высокоточной БИНС, является многоантенная глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), в состав которой входит более двух антенн. Современная точность определения углов ориентации с помощью двухантенных и трёхантенных систем составляет порядка первых десятых долей градуса на характерную длину базовых линий в 1 метр [1]. Базовая линия определяется как вектор, соединяющий фазовые центры двух спутниковых антенн.

Общепринятый подход решения задачи состоит в следующем. Для каждой базовой линии, координаты которой априорно известны в системе координат, связанной с корпусом объекта, находится оценка координат в опорной системе координат – например, в географической. Таким образом, для каждой базовой линии ставится смешанная задача целых наименьших квадратов, которая возникает из-за целочисленной неоднозначности разности фазовых измерений и решается численно, например, с помощью метода LAMBDA [2]. В нашей работе используется его численная модификация – MLAMBDA [3]. После разрешения целой неоднозначности фазовых измерений и получения координат базовых линий в опорной и связанной с корпусом объекта системах координат, их взаимную ориентацию можно найти численно как решение оптимизационной задачи для соответствующей матрицы ориентации [4].

Эксперимент. В августе 2023 года в Москве был проведён эксперимент с многоантенной ГНСС при относительно благоприятных городских условиях. Спутниковые антенны были прикреплены к деревянной доске, которая представляет собой корпус объекта-носителя навигационной системы и расположена примерно в горизонтальной плоскости. Во время записи спутниковых измерений было реализовано 7 статических положений с помощью трёх поворотов на 90° вокруг вертикали сначала в одну сторону, а затем трёх аналогичных поворотов – в противоположную. Время нахождения в каждом положении составляло 20 минут, а общая длительность эксперимента – около 2.5 часов. Характерные особенности эксперимента:

- многоантенность: 2 антенны Antcom G8Ant подключены к приёмнику Novatel PwrPak7D, 1 антенна Novatel GNSS-804 – к приёмнику Novatel PwrPak7, 2 антенны Javad AirAnt – к приёмникам Javad Prego;
- многосистемность: все приёмники обрабатывают сигналы от GPS и ГЛОНАСС, а приёмники Novatel – ещё и от Galileo, Beidou;

¹ Научный руководитель к.ф.-м.н., в.н.с. лаборатории Козлов А.В.

- короткие базовые линии: максимальное расстояние между любыми двумя антеннами не превышает одного метра.

Получение эталонной ориентации. Основной целью эксперимента является оценка точности определения ориентации по измерениям многоантенной ГНСС, поэтому эксперимент был устроен так, что по его данным получены эталонные углы ориентации, точность которых в несколько раз лучше характерной точности решения задачи с помощью многоантенной ГНСС. В работе ориентация корпуса объекта-носителя относительно опорной географической системы координат описывается тремя углами крена, тангажа и курса.

Эталонный угол курса. После окончания основного эксперимента объект находился в начальном положении. Одна из пяти антенн была переустановлена так, чтобы образовывать длинную базовую линию (больше 4 метров) с любой из антенн, оставшихся на корпусе объекта. В такой статической конфигурации производилась отдельная запись спутниковых измерений для пяти антенн. Геометрия расположения антенн относительно корпуса и соответственно друг относительно друга была измерена, а также получена оценка её точности. Пользуясь тем, что ошибка оценки угла курса обратно пропорциональна длине базовой линии, можно получить эталонную оценку курса для коротких базовых линий в основном эксперименте.

Эталонные углы крена и тангажа. Для получения эталонных углов крена и тангажа во всех статических положениях эксперимента использовались измерения акселерометров предварительно калиброванной микроэлектромеханической БИНС, которая была также установлена на корпусе объекта. Задача получения эталонных углов крена и тангажа была сведена к линейной задаче оценивания и решена методом наименьших квадратов. В математической модели учитывалось как наличие непостоянства оси вращения корпуса объекта, так и угловые рассогласования приборной системы координат, связанной с осями чувствительности акселерометров, относительно системы координат, связанной с корпусом объекта. Также получена верхняя оценка точности углов крена и тангажа для каждой базовой линии.

Методология сравнения ориентаций. В докладе будут представлены результаты анализа ошибок углов ориентации в эксперименте для разных базовых линий. Ошибки оценок углов ориентации базовых линий раскладываются на две составляющие: систематическую низкочастотную и шумовую высокочастотную. Для каждой из компонент проанализирован вклад в общую ошибку ориентации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Raskaliyev, A., Patel, S.H., Sobh, T.M., Ibrayev, A.** GNSS-based attitude determination techniques—a comprehensive literature survey. *IEEE Access*, 8, 2020, pp. 24873-24886. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970083.
2. **Teunissen P.J.** Least-squares estimation of the integer GPS ambiguities. *Invited lecture, section IV theory and methodology, IAG general meeting, Beijing, China*, 1993, pp. 1-16.
3. **Chang, X.W., Yang, X., Zhou, T.** MLAMBDA: A modified LAMBDA method for integer least-squares estimation. *Journal of geodesy*, 79, 2005, pp. 552-565. DOI: 10.1007/s00190-005-0004-x.
4. **Wahba G.** A least squares estimate of satellite attitude. *SIAM review*, 7(3), 1965, pp. 409-409. DOI: 10.1137/1007077.

F.S. Kapralov (Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia). **Modern precision of attitude determination using multi-antenna satellite navigation system**

Abstract. The report focuses on the analysis of the precision of attitude determination by range satellite measurements from a multi-antenna navigation system. Results are presented from the processing of a real experiment with five satellite antennas within one metre of each other. A reference orientation is obtained with a precision multiple times higher than the current typical precision of attitude determination using a multi-antenna satellite system. This allows for a comprehensive examination of attitude angle errors.

И. А. АКИМОВ

(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва)

ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ВЕКТОРА ВОЗМУЩЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ПО ПОВТОРНЫМ АЭРОГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Предложен подход к определению вектора возмущения силы тяжести, использующий аэрогравиметрические измерения на повторных маршрутах. Основу алгоритма в новом подходе составляют уравнения ошибок гравиметра и корректирующих измерений СНС. Модель поля задается кубическими базисными сплайнами на прямой. Коэффициенты при сплайнах входят в вектор состояния системы и оцениваются фильтром Калмана. Представлены результаты обработки модельных данных.

Введение. Традиционно в аэрогравиметрии определяется вертикальная компонента вектора возмущения силы тяжести (ВВСТ) по измерениям аэрогравиметра на траектории полета летательного аппарата. В работе рассматривается задача определения также горизонтальных компонент [1]. Предполагается использование бескарданного аэрогравиметра, в состав которого входит бескарданная инерциальная навигационная система (БИНС) и приемники спутниковой навигационной системы (СНС) [2]. Решение рассматриваемой задачи затруднено влиянием инструментальных погрешностей БИНС аэрогравиметра на измерения компонент ВВСТ [3-5]. Известные подходы к решению основаны на априорных моделях, зависящих от времени полета, которые не всегда позволяют разделить ВВСТ и инструментальные погрешности в алгоритме оценивания [3]. В настоящей работе представлен новый подход, основанный на измерениях на повторных галсах и учете повторяемости на них компонент ВВСТ. Априорная модель ВВСТ строится при помощи кубических базисных сплайнов на прямой с параметризацией координатой вдоль галса. Задача определения ВВСТ сводится к задаче интеграции БИНС-СНС и ее решению при помощи фильтра Калмана. Проверка подхода на модельных данных показала его работоспособность и эффективность при наличии повторных галсов.

Постановка задачи и алгоритм решения. Введем географическую систему координат с центром в точке M , положении чувствительной массы акселерометров аэрогравиметра, и введем в ней ВВСТ $\Delta \mathbf{g} = \mathbf{g} - \mathbf{g}_0$, составленный из проекций на восток, север и вверх по нормали к эллипсоиду. Здесь \mathbf{g} и \mathbf{g}_0 – векторы реальной и нормальной силы тяжести в точке M . Поставим задачу определения $\Delta \mathbf{g}$ по первичным измерениям гравиметра. Будем предполагать наличие повторных галсов (маршрутов). В основу решения задачи положим уравнения ошибок БИНС гравиметра и корректирующих измерений (данные СНС) [6]. В состав вектора ошибок включим следующие переменные, где индекс «z» означает проекцию на оси приборного трехгранника БИНС:

- $\Delta g_E, \Delta g_N$ – компоненты ВВСТ;
- $\Delta f_{z1}, \Delta f_{z2}$ – смещения нулей горизонтальных акселерометров;
- v_{z1}, v_{z2}, v_{z3} – дрейфы гироскопов;
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – угловые ошибки определения ориентации приборного трехгранника;
- $\delta V_E, \delta V_N$ – динамические ошибки скорости.

Априорную модель ВВСТ введем при помощи кубических B -сплайнов [7] в виде:

$$\Delta g_E(s(t)) = \sum c^E_i B_i(s(t)), \quad \Delta g_N(s(t)) = \sum c^N_i B_i(s(t)), \quad (1)$$

где $s=s(t)$ – расстояние вдоль галса, $B_i(s)$ – B -сплайн, c^E_i, c^N_i – неизвестные константы, $i=1, \dots, N$, i – номер узла разбиения на галсе, N – число узлов в разбиении.

Включим c^E_i, c^N_i в состав фазового вектора уравнений ошибок БИНС и поставим стандартную линейную задачу оптимального стохастического оценивания. Оценка фазового вектора (с числом неизвестных $2N+10$) определяется фильтром Калмана [8]. Оценки ВВСТ рассчитываются по коэффициентам c^E_i, c^N_i , оцененным на последнем шаге рекурсий фильтра.

Результаты расчетов. Ниже даны результаты проверки алгоритма на модельных данных. Были симулированы измерения БИНС и данные СНС на траектории с двумя повторными гал-

сами. Погрешности измерений инерциальных датчиков имитировались в соответствии с характеристиками БИНС [2]. Сымитированные систематические погрешности датчиков включали постоянные смещения нулей акселерометров ($\Delta f_{z1}=30$, $\Delta f_{z2}=-40$ мГал) и постоянные дрейфы гироскопов (0.003 град/ч).

Результаты оценивания ВВСТ представлены на рис. 1. Среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибки оценки равно 2 мГал, среднее значение ошибки оценки – 3-5 мГал (эталонные данные – модель поля *EGM2008*). Данный результат можно считать обнадеживающим, учитывая величину угловых ошибок ориентации БИНС, достигающую 8 угл. сек. (на рисунке не представлены). Отметим также высокую точность оценивания смещений нулей акселерометров (разность с эталоном – 1 мГал).

На рис. 1 также представлены результаты оценивания ВВСТ стандартным алгоритмом, использующим априорную модель во времени и сводящимся к фильтру Калмана. Из табл. 1 следует, что точность оценивания ВВСТ стандартным алгоритмом (СКО 3-5 мГал, среднее – 8-12 мГал) хуже, чем новым алгоритмом.

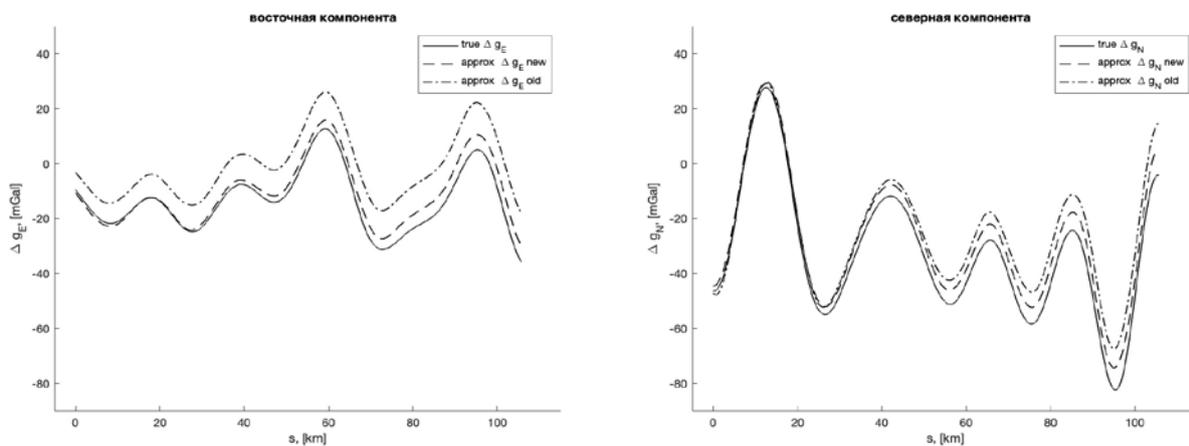


Рис. 1. Оценки ВВСТ новым алгоритмом (пунктир), стандартным алгоритмом (пунктир с точкой) и эталоном (непрерывная кривая) на галсе. Слева: восточная компонента, справа: северная, мГал.

Т а б л и ц а 1

Статистика по результатам оценивания ВВСТ двумя алгоритмами

Параметры	Новый алгоритм	Стандартный алгоритм
Среднее ошибки оценки Δg_E , мГал	2,74	12,24
Среднее ошибки оценки Δg_N , мГал	4,72	7,82
СКО ошибки оценки Δg_E , мГал	2,40	3,44
СКО ошибки оценки Δg_N , мГал	1,78	5,19

Заключение. Решается задача оценивания ВВСТ по аэрогравиметрическим измерениям на повторных галсах. Строится модель ВВСТ, основанная на кубических базисных сплайнах, параметризованных координатой вдоль галса. Поставлена задача оценивания и построен алгоритм решения. Эффективность алгоритма подтверждена обработкой модельных данных, показавшей обнадеживающие результаты (СКО ошибки оценки – 2 мГал) при наличии двух повторных галсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Современные методы и средства** измерения параметров гравитационного поля Земли. Под общ. ред. Пешехонова В.Г., науч. ред. Степанова О.А. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2017. 390 с.
2. **Golovan A.A., Vyazmin V.S.** Methodology of airborne gravimetry surveying and strapdown gravimeter data processing. *Gyroscopy Navig.* 2023. V. 14. P. 36–47.

3. **Kwon J.H., Jekeli C.** The effect of stochastic gravity models in airborne vector gravimetry. *J. Geoph.*, 2002. P. 770–776.
4. **Cai W., Zhang K., Wu M.** Improving airborne strapdown vector gravimetry using stabilized horizontal components. *J. Appl. Geophys.*, 2013. V. 98. P. 79–89.
5. **Fang K., Cai T.** An algorithm for strapdown airborne gravity disturbance vector measurement based on high-precision navigation and EGM2008. *Sensors*. 2024. V. 24. P. 5899.
6. **Farrell J. A.** Aided navigation systems: GPS and high rate sensors. 2008. New York, NY, McGraw-Hill.
7. **Cheney E.W., Kincaid D.R.** Numerical Mathematics and Computing. Brooks/Cole Publishing Co., 2007. 784p.
8. **Kailath T., Sayed A.H., Hassibi B.** Linear Estimation. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2000. 854p.

I.A. Akimov (Lomonosov Moscow State University, Moscow). **An approach to estimating disturbance of the gravity vector based on repeated airborne observations**

Abstract. An approach to estimating components of the disturbing potential from airborne observations at repeated lines is presented. The use of a strapdown airborne gravimeter is assumed. The proposed approach is based on the error equations of gravimeter's inertial measurement unit and observation equations based on GNSS. A model of the disturbing potential components is constructed using the cubic splines parameterized by the distance along the flight path. The unknown coefficients at the splines are included in the system's state vector and estimated by the Kalman filter. Numerical results from simulated data processing were obtained.

Е. В. ШЕСТАКОВА

(Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СБОЕВ В ИЗБЫТОЧНОМ БЛОКЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассматривается задача детектирования сбоев в избыточном блоке датчиков угловой скорости; исследовано четыре метода: метод "нулевых" линейных комбинаций, метод наименьших квадратов, метод наименьших модулей и гарантирующий подход.

Введение. Для повышения надежности навигационной системы используются избыточные блоки инерциальных сенсоров — датчиков угловой скорости. Вместо обычно используемых трех взаимно ортогональных чувствительных элементов используются шесть датчиков. Рассматривается задача выявления сбоев в избыточном блоке датчиков угловой скорости. Исследуются четыре метода: метод "нулевых" линейных комбинаций, метод наименьших квадратов, метод наименьших модулей и гарантирующий подход.

Постановка задачи определения сбоев. Измерения, доставляемые блоком датчиков угловой скорости (в один заданный момент времени), имеют вид:

$$z = Gq + \varrho, \quad (1)$$

где $z = (z_1, \dots, z_6)^T \in R^6$ — вектор, составленный из показаний блока датчиков угловой скорости, G — известная матрица, $q \in R^3$ — вектор оцениваемых компонент угловой скорости в проекциях на оси приборного трехгранника, $\varrho = (\varrho_1, \dots, \varrho_6) \in R^6$ — вектор, составленный из помех измерений.

Предполагается, что в один момент времени во всех каналах блока могут происходить не более двух сбоев. Необходимо детектировать возможные сбои в каналах измерений блока. Иными словами, нужно определить наличие сбоев и установить, в каких каналах они произошли.

В работе рассмотрены несколько методов определения сбоев и проведено их численное тестирование.

Метод «нулевых» линейных комбинаций. При использовании этого метода предполагается, что в каналах измерений может произойти не более одного сбоя. Суть метода состоит в следующем. Находятся такие векторы x , чтобы исключить полезный сигнал:

$$G^T x = 0. \quad (2)$$

Таким образом осуществляется непосредственный «доступ к помехе»:

$$x^T z = x^T \varrho.$$

Решив систему (2) можно получить шесть линейных комбинаций $x[1], \dots, x[6]$, в каждой из которых содержится ровно один нулевой элемент (в $x[i]$ компонента с номером i равна нулю). Чтобы установить наличие единственного сбоя, необходимо скалярно умножить вектор измерений z на 6 линейных комбинаций $x[i]$. Тогда сбой происходит в канале с номером i тогда и только тогда, когда i -ая комбинация равна нулю (близка к нулю), а остальные (при наличии сбоя) существенно отличаются от нуля. При отсутствии сбоев все комбинации равны нулю. Таким образом, наличие единственного сбоя можно определить по одной «нулевой» (небольшой по величине) комбинации и остальным ненулевым.

Методы наименьших квадратов и наименьших модулей. Также исследованы возможности классических методов оценивания — метода наименьших квадратов и метода наименьших модулей [1]. Сначала ищется оценка \hat{q} вектора параметров q с помощью метода наименьших

модулей (или наименьших квадратов). Затем по полученной оценке \hat{q} строится оценка помехи по формулам

$$\hat{Q}_i = z_i - G_i \hat{q}, \quad i=1, \dots, 6,$$

абсолютное значение которой сравнивается с пороговым значением. Предполагается, что в том канале, где оценка помехи по абсолютной величине больше порогового, произошел сбой.

В результате численного моделирования установлено, что при столь малом количестве измерений (равном 6) традиционные подходы не дают новых преимуществ. Метод наименьших квадратов не всегда идентифицирует даже один сбой. Метод наименьших модулей определяет один сбой, но требует несколько больше вычислительных затрат, чем метод "нулевых" линейных комбинаций. Надежно два сбоя не идентифицируют ни метод "нулевых" комбинаций, ни традиционные методы.

Метод гарантирующего оценивания. Рассматривается новый подход для выяснения принципиальной возможности детектирования двух сбоев, основанный на методе гарантирующего оценивания [2-4]. Алгоритм определения сбоев состоит в следующем. Для каждой строки матрицы G строится оценка скалярной величины $\hat{G}_i q$ при помощи метода гарантирующего оценивания. Задача ставится как оптимальная задача оценивания, в которой минимизируется максимальное значение модуля ошибки оценивания $\hat{G}_i q$ при всевозможных значениях неопределенных факторов. При этом предполагается, что абсолютное значение помехи ограничено заданной положительной величиной σ :

$$|q_i| \leq \sigma, \quad i = 1, \dots, 6.$$

Затем по формулам

$$\hat{Q}_i = z_i - \hat{G}_i q, \quad i=1, \dots, 6$$

определяется оценка помехи, которая сравнивается с пороговым значением.

Для оценивания помехи q необходимо решить набор вариационных задач, которые сводятся к задачам линейного программирования. В силу малой размерности вариационных задач соответствующая вычислительная нагрузка весьма умерена. Вместе с тем, задача гарантирующего оценивания может служить эталоном для оценки качества функционирования других более просто реализуемых алгоритмов. Достоинство гарантирующего подхода состоит в том, что задача детектирования сбоев ставится как оптимальная задача оценивания, поэтому, в отличие от традиционных подходов, для оценивания используется вся имеющаяся информация. Кроме того, удастся вычислить и оптимальную гарантированную ошибку определения соответствующих параметров. При помощи обширного моделирования установлено, что метод гарантирующего оценивания позволяет выявлять два сбоя в блоке датчиков угловой скорости.

Заключение. Решена задача выявления сбоев в избыточном блоке, состоящем из шести датчиков угловой скорости. Проанализированы различные методы детектирования сбоев. В результате численного моделирования установлено, что гарантирующий подход дает наилучший результат.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И.Мудров, В.Л.Кушко. Метод наименьших модулей. Изд. 2-е, — М.: УРСС, 2013.
2. А.Б.Куржанский. Управление и оценивание в условиях неопределенности. — М.: Наука, 1977.
3. М.Л.Лидов. Минимаксные методы оценивания, Препринт №71 ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010.
4. А.И.Матасов. Метод гарантирующего оценивания. М.: Изд-во МГУ, 2009.

E.V. Shestakova (Lomonosov Moscow State University, Moscow). **Failure detection for a redundant sensor unit.**

Abstract. We solve the problem of detecting failures in a redundant unit of angular velocity sensors; four methods are investigated: the method of "zero" linear combinations, the least squares method, the least absolute deviations method, and the guaranteeing approach. Numerical testing shows that the guaranteeing estimation method provides the most accurate results.

И. С. АРХИПОВ

(Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург)

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ОПЕРАЦИОННАЯ СИСТЕМА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ СОВМЕСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ

В статье представлена мультиагентная операционная система реального времени, предназначенная для совместного управления роботами. Освещаются архитектура системы, текущие функциональные возможности и планы по её дальнейшему развитию, а также ключевые особенности, отличающие данное решение от существующих аналогов.

Введение. В последние годы мультиагентные технологии привлекают всё большее внимание, особенно в контексте совместного управления роботами. Исследователи активно работают над созданием интегрированных систем, которые объединяют несколько конечных устройств с AI-агентами в единую экосистему. Для решения подобных задач необходимы специализированные технологические решения. Хотя современные подходы часто основываются на операционных системах реального времени общего назначения, таких как FreeRTOS, использование специализированного программного обеспечения может значительно упростить процесс. В данной статье будет представлено разработанное решение, ориентированное на мультиагентное управление в реальном времени.

Обзор существующих решений. В качестве примера рассмотрим одну из самых популярных операционных систем на рынке, FreeRTOS (<https://github.com/FreeRTOS>). FreeRTOS имеет открытый исходный код с лицензией MIT и поддерживается компанией Amazon. FreeRTOS поддерживает более 35 микропроцессорных архитектур. Диспетчер задач поддерживает как вытесняющую, так и кооперативную многозадачность, а также приоритеты процессов, семафоры и очереди. Имеет несколько узконаправленных вариантов, таких как Amazon FreeRTOS, SafeRTOS, OpenRTOS, ESP-IDF FreeRTOS. Однако операционная система не имеет специализированного API для совместного управления роботами, например, сетевого интерфейса. Данный интерфейс обычно реализуется в виде библиотек производителями аппаратного обеспечения.

Предлагаемое решение. В данном докладе представлена специализированная операционная система под названием Martos (<https://github.com/IvanArhipov1999/Martos>), разработанная с акцентом на мультиагентные технологии и совместное управление роботами. Martos включает в себя non-preemptive диспетчер задач, который обеспечивает эффективное распределение ресурсов, минимизируя накладные расходы на переключение контекста. Также в системе реализованы механизмы управления памятью, что позволяет оптимально использовать доступные ресурсы и предотвращать утечки памяти.

Дополнительно Martos предоставляет функциональность работы с таймерами, что критически важно для синхронизации действий агентов и выполнения времязависимых задач. Сетевой интерфейс позволяет агентам взаимодействовать друг с другом и обмениваться данными в реальном времени, что способствует более эффективному совместному решению задач.

Операционная система разработана на языке программирования Rust, который известен своей безопасностью и производительностью, что делает Martos надежным решением для встраиваемых систем. Кроме того, Martos успешно портирована на микроконтроллеры ESP32 и ESP32-S6, что расширяет её область применения и позволяет использовать данную ОС в различных устройствах и сценариях, требующих высокопроизводительного мультиагентного управления.

Планируемая функциональность. В будущем планируется разработать интерфейс программирования приложений (API), который позволит осуществлять поиск среднего значения

¹ Научный руководитель: д. ф.-м. н., проф. Граничин О.Н.

различных величин, находящихся на разных агентах в системе. Эта функциональность может оказаться крайне полезной в нескольких аспектах. Во-первых, она позволит синхронизировать время на различных узлах, что, в свою очередь, обеспечит согласованность выполнения процессов между разными агентами. Это особенно важно для задач, требующих точной координации действий, таких как распределенные сенсорные сети или совместные роботизированные операции.

Во-вторых, данный API может быть использован для распределенного вычисления весов нейронной сети в мультиагентной системе, состоящей из недорогих микроконтроллеров. В таких системах часто возникает необходимость усреднения весов, получаемых от различных агентов, чтобы улучшить качество обучения модели и повысить общую эффективность работы нейронной сети.

Для реализации поиска среднего значения в рамках мультиагентной системы предлагается использовать алгоритм локального голосования [1]. Этот алгоритм позволяет каждому агенту обмениваться информацией с соседями и принимать решения на основе полученных данных, что способствует более эффективному и быстрому достижению консенсуса по среднему значению. Такой подход не только уменьшает нагрузку на сеть, но и повышает устойчивость системы к сбоям отдельных агентов, что делает его особенно подходящим для использования в условиях ограниченных ресурсов.

Заключение. В заключение статьи можно отметить, что текущие разработки мультиагентной операционной системы реального времени для совместного управления роботами демонстрируют значительный прогресс в области управления задачами, памяти и сетевыми взаимодействиями. Реализация диспетчера задач и функциональности работы с таймерами уже закладывает основу для эффективного функционирования системы. В будущем планируется внедрение API для поиска средних величин на различных агентах с использованием протокола локального голосования, что позволит улучшить координацию и синхронизацию действий роботов. Эти шаги направлены на создание более устойчивой и эффективной мультиагентной системы, способной решать сложные задачи в реальном времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Amelina N. et al.** Approximate consensus in stochastic networks with application to load balancing //IEEE Transactions on Information Theory. – 2015. – Т. 61. – №. 4. – С. 1739-1752.

I.S. Arkhipov (St Petersburg University, St Petersburg). **Multi-agent real-time operating system for collaborative robot control**

Abstract. The article presents a multi-agent real-time operating system designed for collaborative robot control. It covers the system architecture, current functionalities, and plans for further development, as well as key features that distinguish this solution from existing analogues.

П. С. МИХАЙЛОВ, В. Н. КОНЕШОВ, В.Н. СОЛОВЬЕВ
(Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва)

ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И ОПЫТ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ МОРСКИХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Представлены оценки точности современных глобальных моделей гравитационного поля Земли, полученные по результатам сравнений с площадными съемками. В результате оценок, выполненных на разных широтах и над различными структурами, выявлены закономерности распределения погрешностей в моделях и особенности их изменения. Рассмотрены примеры практического применения моделей при выполнении морских съемок.

Введение. Глобальная спутниковая модель гравитационного поля Земли содержит данные об аномалиях в свободном воздухе на уровне геоида. Возможности практического использования моделей зависят от таких характеристик как разрешающая способность и точность представления аномалий. Благодаря методу спутниковой альтиметрии современные модели имеют лучшие детальность и точность именно на акваториях Мирового океана. Максимальное разрешение современной модели, построенной на основе альтиметрических данных, в настоящее время достигло 1 угловой минуты. Такое разрешение позволяет строить карту аномалий масштаба до 1:200 000. При этом спутниковые данные содержат большие ошибки, чем инструментальные измерения, поэтому с использованием данных площадных морских съемок как более высокоточных, можно судить о достоверности глобальных моделей. Кроме того в настоящее время глобальные спутниковые модели гравитационного поля Земли уже находят эффективное применение в процессе выполнения морских гравиметрических съемок. В докладе приведено несколько примеров использования авторами глобальных моделей для уточнения систематического дрейфа морского гравиметра и выполнения морской съемки без начальных и завершающих береговых неподвижных измерений [1].

Оценки глобальных моделей. Наиболее эффективный и простой способ оценки модельного поля заключается в сравнении модельных данных с высокоточными прямыми площадными съемками, например морскими. В Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта были выполнены масштабные площадные сравнения современных глобальных моделей гравитационного поля с высокоточными морскими съемками в разных широтах и над различными геоморфологическими структурами Мирового океана. Задачей этих исследований было определение фактической точности моделей, выявление основных трендов в их развитии и закономерностей в распределении погрешностей.

Оценки показали, что в области абиссальных равнин все исследуемые модели имеют близкую точность относительно морских гравиметрических съемок. Погрешность модельных данных по среднеквадратическому отклонению в таких регионах оценивается в районе 1 мГал. Однако с ростом величины горизонтального градиента изменения аномального поля погрешность моделей значительно увеличивается, как и увеличиваются расхождения в точностях между ранними и новыми моделями. Например, в районах срединно-океанических хребтов, погрешность модели EGM2008 по СКО оценивается в 5 мГал, китайской модели SGG-UGM-2 [2] в 4 мГал, а новейших моделей Sandwell and Smith [3] и DTU [4] уже в 2,5 – 2,7 мГал. Было выявлено также, что погрешности современных глобальных моделей практически на всех акваториях Мирового океана зависят в большей степени от величины полного градиента самого аномального поля и не зависят от широты [5].

С использованием оценок, полученных в регионах содержащих разные по величине горизонтального градиента аномального поля структуры, можно определить общую функциональную зависимость погрешности глобальной модели от величины горизонтального градиента и,

¹ Научный руководитель *проф.*, руководитель научного направления Конешов В.Н.

таким образом, получить оценочные сведения об ожидаемой погрешности данной модели в любом интересующем районе Мирового океана.

Использование глобальных моделей в процессе морских съемок. Рост точности глобальных моделей позволяет эффективно использовать их в практике выполнения морских гравиметрических съемок. С привлечением модельных данных об аномальном гравитационном поле Земли могут решаться такие задачи как уточнение скорости смещения нуля морского гравиметра, контроль работы приборов.

Как правило, морской гравиметр имеет непрерывный дрейф нуля, индивидуальный для каждого прибора в некотором диапазоне. Скорость дрейфа обычно определяется при исходных береговых неподвижных измерениях и уточняется в ходе заключительных береговых измерений. Еще одним известным способом уточнения скорости дрейфа гравиметра, если он линейен, может быть оценка показаний прибора в точках пересечения съемочных линий. Однако в современной практике гравиметрические съемки часто выполняются вместе с сейсмическими исследованиями, а современные сейсмические суда могут работать практически без заходов в порты. Более того 3Д сейсмическая съемка часто не предполагает секущих линий. В такой ситуации единственной возможностью определить параметры работы прибора остается использование модельных данных об аномалиях гравитационного поля.

Так как глобальная модель не содержит систематических составляющих погрешности, сравнение измерений гравиметром с модельным полем позволяет выявить систематических дрейф в показаниях прибора. Более того с ростом точности и детально современных моделей появляется возможность определить не только скорость, но и характер дрейфа и учесть это при обработке съемки. На рисунке 1 показан пример оценки работы гравиметра на полигоне, после его включения из «холодного» состояния непосредственно в море. На рисунке также видно изменение скорости дрейфа, обусловленное переходным процессом.

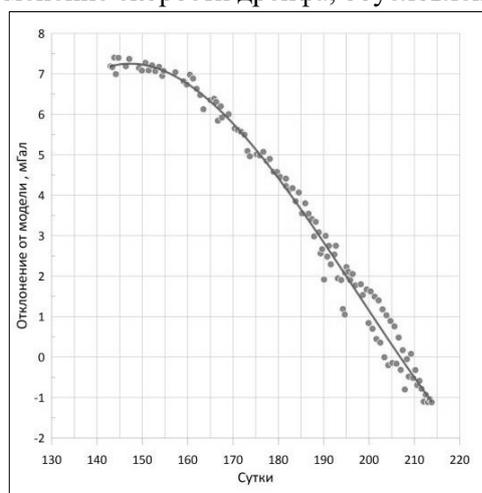


Рис. 1. Определение скорости и характера дрейфа гравиметра в море путем сравнения измерений на линиях с данными глобальной модели.

Второй задачей, в которой, глобальная модель находит свою применимость, является контроль корректности работы приборов. На этапе контроля качества морских измерений необходимо оперативно оценивать показания гравиметра. При наличии нескольких гравиметров на борту это делается путем сравнения их показаний, но отличия в показаниях двух гравиметров также приводят к неоднозначности. Использование модельного поля позволяет выявить отклонения в работе как одного так и нескольких гравиметров и принять меры для устранения возможных проблем.

Третьей задачей является редукция съемки к уровню глобального модельного поля. В практике современной морской гравиметрии не всегда и не во всех портах выхода судна имеются надежные станции IGSN71. А в случае включения гравиметра непосредственно в море привязка к абсолютному значению силы тяжести отсутствует в принципе. Глобальное модельное поле представлено в море на уровне геоида, поэтому может быть использовано для вычисления абсолютного уровня морской съемки, что также позволяет совместно обрабатывать съемки, выполнение от разных береговых станций или при их отсутствии.

Заключение. Показаны фактические оценки современных моделей гравитационного поля в открытых районах Мирового океана. По точности и детальности представления аномалий спутниковые модели пока не могут заменить инструментальные морские и аэрогравиметрические съемки. При этом могут использоваться для планирования съемок и в процессе их производства с целью повышения качества и надежности получаемых данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Peshekhonov V. G., Stepanov O. A. (eds.)**. Methods and Technologies for Measuring the Earth's Gravity Field Parameters. Springer Nature (Switzerland). 2022. P. 396. DOI: 10.1007/978-3-031-11158-7.
2. **Wei Liang, Jiancheng Li, Xinyu Xu, Shengjun Zhang, Yongqi Zhao** A High-Resolution Earth's Gravity Field Model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, Satellite Altimetry, and EGM2008 // Research Geodesy and Survey Engineering. 2020. Vol. 6. Issue 8. Pp. 860 – 878. DOI: 10.1016/j.eng.2020.05.008
3. **Sandwell, D. T., Müller R. D., Smith W. H. F., Garcia E., Francis R.** New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. Science. 2014. Vol. 346. No. 6205. pp. 65-67. DOI: 10.1126/science.1258213.
4. **Andersen O.B., Knudsen P.** The DTU17 global marine gravity field: First validation results, in International Association of Geodesy Symposia. Cham. Springer. 2020. pp. 83-87. DOI: 10.1007/1345_2019_65
5. **Mikhailov, P.S., Koneshov, V.N., Solovyev, V.N., Zheleznyak L. K.** New Results of Estimation of Modern Global Ultrahigh-Degree Models of the Earth's Gravity Field in the World Ocean. Gyroscopy Navig. 2022. 13, pp. 210–221 DOI: 10.1134/S2075108722040095

P. S. Mikhailov, V. N. Koneshov, V. N. Solovyev (Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow). **Assessments of the accuracy of modern global models of the Earth's gravity field and experience of their use in performing marine gravimetric surveys**

Abstract. Presents estimates of the accuracy of modern global models of the Earth's gravity field, obtained from comparisons with area surveys. As a result of estimates made at different latitudes and over different structures, patterns of error distribution in models and features of their change were revealed. Examples of practical application of models in marine surveys are considered.

А. Р. БРАЖЕНКО

(ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН», Санкт-Петербург)

А. О. КОМАРОВ

(Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород)

АЛГОРИТМ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ УГРОЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛЬНО-ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В АВТОПИЛОТИРУЕМЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Предложен алгоритм для локализации и анализа направлений угроз в автопилотируемых транспортных системах с использованием визуально-языковых моделей (VLM). Применение VLM позволяет точнее определять поведение и траектории объектов в сложных сценариях, включая динамичные городские условия и непредсказуемые изменения окружающей среды.

Введение. Современные технологии беспилотного транспорта сталкиваются с вызовами, связанными с безопасной навигацией в условиях реального мира, где угроза возникновения опасных событий значительно возрастает. Существующие системы [1, 2] часто используют классические алгоритмы анализа изображений, которые не всегда эффективно решают задачи в сложных сценариях. В России в последние годы активно развиваются методы, использующие глубокое обучение для детекции угроз, включая подходы на основе трансформеров [3], которые учитывают контекстуальные аспекты. Однако эти методы ограничены в реальных условиях, например, при наличии перекрывающихся объектов или сложных взаимодействиях между объектами. Предложенный алгоритм, основанный на визуально-языковых моделях (VLM), повышает эффективность локализации [4] за счёт интеграции визуальной и текстовой информации, что позволяет более точно учитывать динамику и изменения окружающей среды.

Постановка задачи. В данной работе ставится задача создания алгоритма, способного локализовать объекты, угрожающие движению беспилотного наземного транспорта, и определять их направление на основе изображений, полученных с камер. Необходимо, чтобы алгоритм учитывал не только визуальные характеристики объектов, но и их поведенческие модели, что поможет более точно предсказывать их движение. Ключевые аспекты задачи включают:

1. Использование визуально-языковых моделей для генерации текстового описания сцены на основе изображений, что позволяет получить контекстуальную информацию о происходящем.
2. Локализация и отслеживание угрожающих объектов в кадре на основании описания, полученного с помощью VLM, включая как статичные, так и динамичные элементы.
3. Анализ поведения объектов и их траекторий для оценки возможных угроз для беспилотного транспортного средства.

Алгоритм локализации и определения направления воздействия угрожающих событий. Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Передача изображения в визуально-языковую модель (VLM) [5].
2. Генерация текстового описания сцены, ограничивающих рамок, и вероятностей угроз.
3. Извлечение ключевых точек объекта.
4. Определение направления и визуализация движения объектов.

На вход алгоритм получает изображение I с камер транспортного средства, которое передаётся в визуально-языковую модель основанную на механизме внимания [6] и архитектуре Kosmos-2 [7], с дообучением на специализированных контекстных заданиях с использованием адаптера LoRA [8]. В архитектуру модели был добавлен линейный слой с сигмоидной функцией активации для бинарной классификации, предсказывающий вероятность принадлежности объекта к классам «угроза» или «не угроза».

Адаптер LoRA добавляет обучаемые низкоразмерные матрицы в архитектуру модели для адаптивного дообучения. Входное изображение I после обработки базовой модели f подаётся на LoRA, используя следующие операции:

$$W_{LoRA} = W + \alpha \cdot A \cdot B,$$

где W — исходные веса базовой модели, A и B — низкоразмерные матрицы (адаптеры LoRA), которые инициализируются случайными значениями и оптимизируются в процессе обучения, α — масштабирующий коэффициент для регулирования вклада адаптера. Масштабирующий коэффициент $\alpha = 8$ был выбран эмпирически для оптимального баланса между производительностью исходной модели и улучшением адаптации с помощью LoRA.

Для задачи бинарной классификации угроз используется функция потерь на основе бинарной кросс-энтропии, которая оптимизируется для минимизации ошибки классификации. Добавлен дополнительный регуляризационный член, учитывающий специфику данных и направленный на снижение ложных срабатываний для класса "не угроза". Формула функции потерь имеет вид:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \cdot \log(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \cdot \log(1 - \hat{y}_i)] + \lambda \cdot R(W_{LoRA}),$$

где N — количество образцов, y_i — истинная метка класса для i -го образца ($y_i = 1$ для угрозы, $y_i = 0$ для «не угрозы»), \hat{y}_i — предсказанная вероятность принадлежности класса для i -го образца, λ — коэффициент регуляризации, $R(W_{LoRA})$ — регуляризационный член, зависящий от весов LoRA. Коэффициент регуляризации λ , варьировавшийся от 0.01 до 1.0 в экспериментах, был выбран равным 0.1, что обеспечило баланс между снижением ложных срабатываний и сохранением точности классификации угроз.

Модель генерирует текстовое описание сцены, идентифицируя объекты и определяет их координаты в виде ограничивающих рамок (bounding boxes). Используя контекстное задание P , модель формирует выходные данные:

$$VLM: \{I, P\} \rightarrow \{D, B, C\},$$

где D — текстовое описание сцены, а B — набор ограничивающих рамок, которые определяют положение идентифицированных объектов на изображении, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ — вероятности принадлежности объектов к классу "угроза". Из полученного текстового описания производится извлечение сущностей, их координат и принадлежность к угрозам, что позволяет получить структурированную информацию о сцене.

Для определения направления движения объектов вычисляется вектор, который строится на основе координат ключевых точек тела, получаемых с использованием модели MediaPipe Pose [9]:

- При наличии предыдущих кадров координаты ключевых точек сравниваются поккадрово:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_t - x_{t-1} \\ \Delta y &= y_t - y_{t-1} \end{aligned}$$

где (x_t, y_t) — координаты ключевых точек в текущем кадре, а (x_{t-1}, y_{t-1}) — координаты ключевых точек в предыдущем кадре. На основе этих изменений вычисляется вектор направления:

$$\text{Direction} = \text{atan2}(\Delta y, \Delta x)$$

- Если отсутствуют предыдущие кадры направление определяется только по координатам ступней и головы. Используется следующая формула:

$$\text{Direction} = \begin{cases} \text{right}, & \text{если } \text{head_right} \wedge \text{left_foot_right} \wedge \text{right_foot_right} \\ \text{left}, & \text{если } \text{head_right} \wedge \neg \text{foot_right} \wedge \neg \text{right_foot_right} \\ \text{forward}, & \text{иначе} \end{cases}$$

где head_right определяется по положению головы относительно центра плеч, а left_foot_right и right_foot_right — по положению ступней относительно пяток. Это позволяет системе точно классифицировать направление движения объектов даже при отсутствии информации о предыдущих кадрах.

После вычисления вектора направления для каждого объекта визуализируется направление движения, отображая вектор на изображении от геометрического центра объекта к конечной точке, рассчитанной по направлению. Вектор направления V определяется как:

$$V = (x_{end} - x_{center}, y_{end} - y_{center}),$$

где (x_{center}, y_{center}) — координаты центра объекта, а (x_{end}, y_{end}) — конечные координаты, определяемые на основе ранее рассчитанного направления.

Пример работы алгоритма. На вход алгоритма подается изображение, где объект (пешеход) переходит дорогу.

На выходе из VLM получаем:

Контекст сцены: An image of a woman crossing the street while talking on her phone.

Объекты:

('a woman', (12, 19), [(0.578125, 0.296875, 0.890625, 0.984375)], {'threat': 0.9, 'no_threat': 0.1}),

('the street', (29, 39), [(0.015625, 0.203125, 0.984375, 0.984375)], {'threat': 0.05, 'no_threat': 0.95}),

('her phone', (57, 66), [(0.640625, 0.421875, 0.671875, 0.484375)], {'threat': 0.3, 'no_threat': 0.7}).

Для классификации объектов как «угроза» используется порог вероятности 0.5: при значении выше 0.5 объект определяется как угроза. В данном случае "a woman" с вероятностью 0.9 классифицируется как «угроза», тогда как "the street" и "her phone" (вероятности 0.05 и 0.3 соответственно) — как «не угроза».

Для угроз рассчитывается вектор направления движения. На выходном изображении (рис.1) ключевые точки объекта (пешехода) выделены, а стрелка указывает его направление движения.



Рис.1. Пример работы алгоритма

В обучении алгоритма использовалось 1000 изображений, итоговая F1-мера классификации угроз составила 0.89, что подтверждает высокую точность алгоритма. Метрика рассчитывалась по следующей формуле:

$$F1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall},$$

где *Precision* — доля правильно классифицированных объектов среди всех обнаруженных, а *Recall* — доля правильно классифицированных объектов среди всех истинно положительных случаев.

Заключение. Разработанный алгоритм для локализации и определения направления угроз в беспилотном наземном транспорте демонстрирует высокую эффективность, достигая итоговой F1-меры 0.89 на собранном наборе данных, содержащим 1000 изображений. Новизна подхода заключается в интеграции визуально-языковых моделей (VLM) с дообучением на контекстных запросах, что позволяет использовать не только визуальные данные, но и текстовую информацию для более глубокого анализа поведения объектов и их взаимодействия с окружающей средой. Этот подход обеспечивает более точное и адаптивное распознавание угроз по сравнению с классическими детекторами.

В будущем планируется улучшение алгоритма с акцентом на адаптацию VLM для более точного анализа сложных сцен, включая сценарии с высокой плотностью объектов и переменными условиями освещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Umang Goenka, Aaryan Jagetia, Param Patil, Akshay Singh, Taresh Sharma, Poonam Saini:** Threat Detection In Self-Driving Vehicles Using Computer Vision, Network Security and Data Sciences MIND-2021, 2021
2. **Ahmed M. Ibrahim, Rania M. Hassan:** Real-Time Collision Warning System Based on Computer Vision Using Mono Camera, 2nd Novel Intelligent and Leading Emerging Sci. Conf.(NILES), 2020
<https://habr.com/ru/companies/yandex/articles/763348/>
3. **Ziang Guo, Zakhar Yagudin, Artem Lykov, Mikhail Konenkov, Dzmitry Tsetserukou:** VLM-Auto: VLM-based Autonomous Driving Assistant with Human-like Behavior and Understanding for Complex Road Scenes, IEEE, 2024
4. **Naoki Wake, Atsushi Kanehira, Kazuhiro Sasabuchi, Jun Takamatsu, and Katsushi Ikeuchi:** Open-Vocabulary Action Localization with Iterative Visual Prompting, arXiv preprint arXiv:2408.17422v4, 2024
5. **Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Lukasz Kaiser, Illia Polosukhina:** Attention Is All You Need, 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, CA, USA, 2017
6. **Zhiliang Peng, Wenhui Wang, Li Dong, Yaru Hao, Shaohan Huang, Shuming Ma, Furu Wei:** Kosmos-2: Grounding Multimodal Large Language Models to the World, arXiv preprint arXiv:2306.14824, 2023
7. **Edward J. Hu, Yelong Shen, Phillip Wallis, Zeyuan Allen-Zhu, Yuanzhi Li, Shean Wang, Lu Wang, Weizhu Chen:** LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models, arXiv preprint arXiv:arXiv:2106.09685v2, 2021
8. **Jong-Wook Kim, Jin-Young Choi, Eun-Ju Ha and Jae-Ho Choi:** Human Pose Estimation Using MediaPipe Pose and Optimization Method Based on a Humanoid Model, Applied Sciences 13, 2700., 2023

A.R. Brazhenko (St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg), A.O. Komarov (NNSTU n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod). **Algorithm for Localization and Direction Determination of threat impact Using Vision Language Models in Autonomous Transport Systems**

Abstract. A novel algorithm is proposed for localization and direction analysis of threats in autonomous transport systems using vision-language models (VLM). The application of VLM enables more accurate identification of object behaviors and trajectories in complex scenarios, including dynamic urban environments and unpredictable changes in surroundings.

А. О. КОМАРОВ

(Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород)

А. Р. БРАЖЕНКО

(ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук», Санкт-Петербург)

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ СЦЕНЫ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРЕПЯТСТВИЙ ПО ДВУМ КАМЕРАМ

Предлагается построение 2D Bird's-Eye View (BEV) карты для визуализации препятствий по информации с двух камер. На основе карты глубины строится 2D BEV сцена, на которой отображаются объекты, необходимые для функционирования системы построения маршрута. Это позволяет обеспечить точную визуализацию окружающей среды для последующей автоматической парковки, автоматической поездки или полета в реальных условиях.

Введение. В настоящее время развитие автономного транспорта становится ключевой областью, определяющей будущее транспортной инфраструктуры. Автономные транспортные системы способны повысить безопасность дорожного движения, снизить количество аварий и оптимизировать использование ресурсов. Одним из важнейших аспектов является построение BEV (Bird's Eye View) карты, которая предоставляет автопилоту точное представление о окружающей среде. Современные системы [1, 2, 3], а также отечественные [4, 5, 6] фокусируются на определении объектов в городской среде, таких как дорожные знаки, пешеходы и др. Однако автопилотируемые средства могут использоваться и за пределами городов, где требуется более универсальный метод определения объектов.

Предлагаемый доклад посвящен алгоритму построения BEV карты без использования LiDAR или радаров, в отличие от работ [7, 8], где используется мультимодальный подход. Алгоритм демонстрирует гибкость в условиях освещения и погодных условий, в отличие от традиционных алгоритмов, таких как IPM (Inverse Perspective Mapping), которые чувствительны к изменениям среды. Результаты работы планируются использовать преимущественно в сельскохозяйственной индустрии, где требуется высокая точность и устойчивость к различным условиям окружающей среды. В работе показан подход, который использует нейронную сеть для определения дистанции, а объекты определяет классическими методами компьютерного зрения.

Постановка и метод решения задачи. Система должна автоматически обрабатывать изображение, извлекать из него информацию о глубине объектов, выделять препятствия и отображать их в плоскости, соответствующей BEV-проекции.

На входе имеется изображение I_{RGB} , полученное с камеры, которая фиксирует окружающее пространство в перспективной проекции. Изображение I_{RGB} передается в обученную нейронную сеть F_θ (MiDaS[9]), которая генерирует карту глубины $D(x, y)$:

$$D(x, y) = F_\theta(I_{RGB}),$$

где x, y – координаты пикселя в изображении, а $D(x, y)$ – расстояние до объекта в сцене для каждой точки.

Для получения объектов с карты глубины воспользуемся классическими методами компьютерного зрения:

1. Применяем адаптивное выравнивание гистограммы для получения контрастированного изображения.
2. Фильтруем изображение гауссовским размытием с ядром 5×5 .
3. Используем бинаризацией и морфологической фильтрацией для устранения шумов.
4. Находим контура полученных объектов и создадим ограничивающие прямоугольники.
5. Учитываем расположение камеры с помощью функции G которая преобразует ограничивающий прямоугольник объекта в координаты на BEV-карте:

$$G(B_i) = \begin{cases} T_{front} \left(\frac{\left(x_i + \frac{w}{2}, y_i + \frac{h}{2}, D(x_i, y_i) \right)}{D(x_i, y_i)} \right), & \text{если используется передняя камера} \\ T_{rear} \left(\frac{\left(x_i + \frac{w}{2}, y_i + \frac{h}{2}, D(x_i, y_i) \right)}{D(x_i, y_i)} \right), & \text{если используется задняя камера} \end{cases},$$

где T_{front} — матрица преобразования координат из камеры в BEV для передней камеры, а T_{rear} — матрица преобразования координат для задней камеры, которая учитывает смещение координат относительно автомобиля (например, инверсия направления по оси Y).

Центр объекта и его ширина проецируется в систему координат BEV:

$$P_{cam}(x_{center}, y_{center}, D(x_{center}, y_{center})) = K^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_{center} \\ y_{center} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot D(x_{center}, y_{center}),$$

Итоговая функция $F(D(x, y), rear|front)$ - которая принимает на вход карту глубины и учитывает положение камеры, будет включать преобразование bounding boxes на BEV-карту с учетом положения камеры:

$$\{P_{BEV}(X, Y)\} = F(D(x, y), rear|front) = \{G(B_i, rear|front)\} | B_i \in \text{BoundingBoxes}(D(x, y)),$$

Таким образом, для каждого ограничивающего прямоугольника B_i мы вычисляем координаты объекта на BEV-карте, учитывая, передняя это камера или задняя.

Пример работы алгоритма. На рисунке представлены два изображения с камеры с объектами (1 на передней камере и 2 на задней). На построенной 2d BEV карте видно 3 объекта: один впереди нашей модели транспорта, два сзади. Белые линии – угол обзора камер.



Рис. 1. Пример построения 2d BEV

Для оценки качества алгоритма воспользуемся комбинированной метрикой, которая одновременно учитывает как точность локализации объектов, так и способность определять расстояние до объектов:

$$LPS = \alpha \cdot AP - \beta \cdot DE_{norm},$$

где LPS(Localization Precision Score) – метрика качества, α и β – весовые коэффициенты, которые определяют относительную важность точности обнаружения и расстояния. В данном случае мы выбрали $\alpha = 0.6$ и $\beta = 0.4$, так как точность локализации объектов считается более важной для нашего приложения. AP(Average Precision) – это усредненное значение precision на различных уровнях порога уверенности для всех обнаруженных объектов, DE_{norm} – ошибка дистанции.

Точность алгоритма по метрике LPS составляет 0,57 на 100 изображениях с объектами преимущественно сельскохозяйственного характера. Набор данных включает разнообразные ситуации и объекты, такие как скот, сено, различные виды сельскохозяйственной техники и поля с

культурами. Все изображения были сделаны в высоком разрешении и включают разнообразные условия освещения и погоды. Каждое изображение сопровождается аннотациями, включая координаты объектов и расстояние до них. Это значение указывает на хорошее соотношение между точностью локализации и определением расстояния до объектов, что является хорошим результатом для данного алгоритма.

Заключение. Предложен алгоритм построения сцены в проекции Bird's Eye View (BEV) для визуализации препятствий на основе данных с двух камер. Алгоритм включает в себя несколько ключевых этапов: создание карты глубины, выделение объектов на изображении, определение их границ (bounding boxes), и проецирование объектов в BEV-систему координат с учетом положения камер.

Предложена метрика Localization Precision Score (LPS) которая позволяет эффективно оценивать качество работы алгоритма. Результаты тестирования алгоритма на реальных данных показали, что он способен точно идентифицировать препятствия, обеспечивая высокую степень надежности при построении 2D BEV сцены.

Одним из ключевых преимуществ алгоритма является его независимость от сложной и трудоемкой калибровки камеры, кроме того, алгоритм не требует использования дорогостоящих сенсоров, таких как LiDAR или радары. Это делает предложенный подход не только более доступным, но и гибким, обеспечивая стабильную работу в различных условиях освещения и погоды. Все это подчеркивает его перспективность для применения в системах автопилотирования и других областях, где требуется эффективная визуализация окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. **L. Reiher, B. Lampe and L. Eckstein:** A Sim2Real Deep Learning Approach for the Transformation of Images from Multiple Vehicle-Mounted Cameras to a Semantically Segmented Image in Bird's Eye View. IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2020
2. **Khawlah Bajbaa, Muhammad Usman, Saeed Anwar, Ibrahim Radwan, and Abdul Bais:** Bird's-eye View to Street-View: A Survey. arXiv preprint arXiv: 2405.08961, 2024
3. **Jiayu Yang, Enze Xie, Miaomiao Liu and Jose M. Alvarez:** ParametricBEV: Parametric Depth Based Feature Representation Learning for Object Detection and Segmentation in Bird's-eye View, ICCV, 2023
4. **Berkovich S.B.:** Using inertial navigation systems to monitor the motion of a train. Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2017
5. **Kotov N.I.:** Using Vision Systems to determine the vehicle position on the road, Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems(ICINS), 2017
6. **Bikmaev R.R.:** Improving the accuracy of supporting mobile objects with the use of the algorithm of complex processing of signals with a monocular camera and Lidar, Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)
7. **Wending Zhou, Xu Yan, Yinghong Liao, Yuankai Lin, Jin Huang, Gangming Zhao, Shuguang Cui, Zhen Li:** BEV@DC: Bird's-eye View Assisted Training for Depth Completion, 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vancouver, BC, Canada, 2023, pp. 9233-9242
8. **Haotian Hu, Fanyi Wang, Jingwen Su, Yaonong Wang, Laifeng Hu, Weiye Fang, Jingwei Xu, Zhiwang Zhang:** EA-LSS: Edge-aware Lift-splat-shot Framework for 3D BEV Object Detection, arXiv preprint arXiv:2303.17895, 2023
9. **Reiner Birkel and Diana Wofk** MiDaS v3.1 -- A Model Zoo for Robust Monocular Relative Depth Estimation, arXiv preprint arXiv:2307.14460, 2023

A.O. Komarov (NNSTU n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod), A.R. Brazhenko (St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, Saint Petersburg). **A scene building algorithm for visualizing obstacles using two cameras**

Abstract. A building of 2D Bird's-Eye View(BEV) map for visualizing obstacles based on information from two cameras. Based on the depth map, a 2D BEV scene is built, which displays the objects necessary for the functioning of the route planning system. This makes it possible to provide an exact visualization of the environment for subsequent automatic parking, automatic driving or flying in real conditions.

Т. О. БЕРГЕР, И. А. ЛОМАКА

(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара)

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА СОЛНЕЧНО-СИНХРОННЫХ ОРБИТАХ

Разработана методика выбора параметров пассивных магнитных систем ориентации для обеспечения требуемой ориентации малоразмерных космических аппаратов на солнечно-синхронных орбитах. Методика реализована в специальном программном обеспечении, которое оценивает время затухания угловой скорости, оптимальное расположение и количество магнитных материалов и моделирует динамику ориентации МКА с пассивной системой магнитной стабилизации.

Введение. В последние десятилетия наблюдается быстрый рост числа малоразмерных космических аппаратов (МКА), особенно построенных по стандарту Кубсат. Это обусловлено их многочисленными преимуществами, такими как сокращенные сроки разработки, экономичные решения для производства и запуска, а также широкий спектр возможных применений. Эти особенности привлекают внимание не только научных и образовательных учреждений, но и частного сектора, который уже предлагает услуги как дистанционное зондирование Земли и спутниковая связь с использованием МКА. По мере расширения сфер применения и усложнения миссий возрастают и требования к подсистемам МКА. Это особенно касается систем управления ориентацией, поскольку большинство сложных миссий требует заданной пространственной ориентации [1].

Для миссий с допустимой точностью наведения в пределах 10–15 градусов оптимальным выбором выступают пассивные системы управления, использующие естественное взаимодействие космического аппарата с внешними силами. Среди таких систем наиболее популярными для миссий Кубсатов являются пассивные магнитные системы ориентации (ПМСО), создающие момент сил за счет взаимодействия постоянных магнитов и гистерезисных стержней на борту МКА с магнитным полем Земли. Отсутствие движущихся частей, а также соответствие требованиям малых спутников по размеру, массе и энергопотреблению позволяет рассматривать эти системы как надёжное и простое решение для управления ориентацией [2].

Несмотря на ряд преимуществ, сложный характер магнитных сил и их поведение в космическом полете требуют комплексного, но трудоемкого моделирования углового движения МКА с ПМСО. В литературе представлено множество примеров успешных миссий МКА с использованием ПМСО, подтверждающих их эффективность. В то же время имеется ограниченное количество информации о критериях, на основе которых принимались ключевые проектные решения — такие как количество постоянных магнитов и гистерезисных демпферов, их расположение, размеры и материалы. Отсутствие методик, которые в полной мере учитывают магнитное взаимодействие, влияние внешних сил и особенности формата МКА, ограничивает возможности для оптимального проектирования таких систем.

В данной работе представлена методика, разработанная на Межвузовской кафедре космических исследований Самарского университета, для выбора параметров ПМСО, обеспечивающих требуемую ориентацию в пределах допустимого диапазона отклонений. Методика применяется к солнечно-синхронным орбитам, где околополярная траектория предоставляет как преимущества, связанные с усиленным взаимодействием с магнитным полем, так и сложности, вызванные более резкими изменениями направления линий геомагнитного поля. Методика реализована в специализированном программном обеспечении, предназначенном для моделирования динамики ориентации и оценки времени затухания угловой скорости МКА, оснащенных магнитными материалами.

Пассивные магнитные системы ориентации. В ПМСО используются два типа магнитных материалов: постоянные магниты и гистерезисные демпферы. Постоянные магниты создают момент, который ориентирует их вдоль линий магнитного поля Земли, обеспечивая восстанавливающую силу. Однако вследствие изменений направления магнитного поля в процессе орбитального движения могут возникать колебания, для демпфирования которых в космическом аппарате устанавливаются гистерезисные стержни. Эти колебания особенно ощутимы на полярных и околополярных орбитах, где спутник проходит почти все широты — от Северного до Южного полюса — и подвергается воздействию широкого диапазона интенсивностей и направлений магнитного поля. Это приводит к более динамичным условиям взаимодействия с магнитным полем по сравнению с экваториальными или средними широтами, где вариации поля менее выражены.

Солнечно-синхронные орбиты, представляющие собой тип околополярных орбит, разработаны для пролёта над одной и той же областью Земли примерно в одно и то же местное солнечное время каждый день. Данная согласованность обеспечивает стабильные и предсказуемые условия для наблюдения Земли, проведения научных исследований и выполнения других задач, требующих регулярных и однородных условий освещённости. Кроме того, околополярная природа этих орбит усиливает взаимодействие между магнитными материалами и магнитным полем Земли, что способствует эффективности ПМСО по сравнению с орбитами с меньшими наклонениями.

Дипольные моменты постоянных магнитов должны быть подобраны так, чтобы их восстанавливающее действие эффективно противодействовало моментам внешних сил [3]. Это особенно важно для МКА, чьи низкие инерционные характеристики приводят к высокой подверженности эффектам гравитационного градиента и усиленному влиянию внешних сил. Помимо этого, следует учитывать на низких околоземных орбитах воздействие атмосферного сопротивления, так как у наноспутников баллистический коэффициент значительно выше, чем у более крупных спутников с сопоставимой объемной плотностью [4].

Разработанная методика учитывает особенности динамики как околополярных орбит, так и МКА. На начальном этапе определяются параметры ПМСО, включая характеристики постоянного магнита, требуемую точность ориентации и материал гистерезисного стержня. Анализ гистерезисной петли проводится для сравнения свойств различных материалов, затем рассчитывается минимальный магнитный момент и проверяется наличие резонанса. Далее оцениваются оптимальное расположение и количество магнитных материалов по каждой оси. Методика реализуется в разработанном программном обеспечении, которое включает внутреннюю библиотеку ключевых гистерезисных материалов, часто используемых в миссиях МКА, а также позволяет вводить настраиваемые параметры при наличии.

Не простой характер гистерезисных функций в сочетании с взаимодействием бортовых магнитных материалов с магнитным полем Земли на солнечно-синхронной орбите подчеркивает необходимость точной методики для эффективного моделирования углового движения. Неоптимальное размещение этих материалов может привести к неэффективному управлению ориентацией, что потенциально ставит под угрозу успех миссии. Разработанная методика обеспечивает теоретическую основу для понимания движения МКА под воздействием внешних сил, с установленными на борту магнитными материалами для обеспечения ориентации и стабилизации. Специализированное программное обеспечение служит инструментом для оценки эффективности и выбора оптимальных параметров системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Белоконов И.В., Тимбай И.А., Барина Е.В.** Выбор проектных параметров наноспутника формата CubeSat с пассивной системой стабилизации. // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 1 (108). С. 1–7.
2. **Ovchinnikov M.Yu., Roldugin D.S.** A survey on active magnetic attitude control algorithms for small satellites // Progress in Aerospace Sciences. 2019. V. 109. Article 100546.
3. **M. Ovchinnikov, V. Pen'kov, O. Norberg, S. Barabash,** Attitude control system for the first Swedish nanosatellite "MUNIN", Acta Astronautica 46 (2000).
4. **Белоконов И.В., Тимбай И.А.** Движение наноспутника относительно центра масс на околоземных орбитах: учебное пособие. Самара: Издательство Самарского университета, 2020. 128 с.

T.O. Berger, I.A. Lomaka, (Samara National Research University, Samara), **Parameter Selection for Magnetic Attitude Control of Small Satellites in Sun-synchronous Orbit.**

A methodology for selecting parameters of passive magnetic attitude control systems to ensure the required orientation of small spacecraft in sun-synchronous orbits is presented. This methodology is implemented in dedicated software that evaluates the angular velocity damping time, optimal placement and quantity of magnetic materials, and models the attitude dynamics of small spacecraft with a passive magnetic stabilization system.

ЗЛЫГОСТЕВА М.П., КОЛЕВАТОВ А.П., УЛЬЯНОВСКАЯ Т.А., СЕРГЕЕВ А.М.
(ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь),

ИВШИНА Ю.В.
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ДРЕЙФА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Разбираются модели температурного дрейфа волоконно-оптического гироскопа. Приведены результаты исследования дефектов волоконно-оптического гироскопа, проявляющихся при изменении температуры окружающей среды. Показано, что появление этих дефектов ухудшает эффективность термокомпенсации. По результатам исследования предложена классификация этих дефектов волоконно-оптического гироскопа, позволяющая разделять, создаваемые на их базе инерциальные навигационные системы по классам точности. Разработаны методы идентификации моделей температурного дрейфа волоконно-оптического гироскопа, использующие в том числе и метод нечёткой логики.

Введение. В работе исследуются поведение волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) в составе бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) производства ПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания. На основе многолетних наблюдений за результатами температурной калибровки БИНС на базе ВОГ предложена классификация и идентификация дефектов ВОГ, позволяющая разделять выпускаемые навигационные системы по классам точности.

Модели температурного дрейфа волоконно-оптического гироскопа. Известно, что принцип действия ВОГ основан на эффекте Саньяка [1, 2]: «разность фаз двух световых волн, распространяющихся по замкнутому контуру в противоположных направлениях при вращении контура вокруг оси, нормальной к его плоскости, пропорциональна угловой скорости вращения». Несмотря на кажущуюся относительную простоту датчика, он оказывается весьма подвержен влиянию различных внешних воздействий, которые вызывают побочные дрейфы, искажающие его сигнал, и, как следствие этого, приводящие к увеличению погрешности измерений проекции абсолютной угловой скорости объекта на его ось чувствительности [4-6]. Значительное влияние на характеристики ВОГ оказывает изменение температуры окружающей среды ВОГ. Поэтому одним из основных вопросов, возникающих при разработке БИНС на базе ВОГ является компенсация дрейфов ВОГ, вызванных изменением температуры внутри бесплатформенного измерительного модуля (БИИМ).

Непосредственное измерение температурных градиентов и нахождение корреляционных зависимостей смещения нуля ВОГ затруднительно, т.к. размещение множества датчиков температуры внутри многослойной волоконной катушки представляет собой сложно выполнимую задачу. Построение числовой модели этого эффекта затруднено, так как необходимо учитывать множество параметров, как конструктивных, так и технологических: материал и геометрию каркаса, свойства конкретного типа оптического волокна, материал защитно-упрочняющего покрытия, пропиточного компаунда, коэффициент заполнения катушки, усилие натяжения волокна и т.д. Поэтому исследователями предлагаются упрощённые модели температурного дрейфа ВОГ, предполагая, что усилиями конструкторов и технологов градиентная составляющая температурной погрешности ВОГ будет минимизирована, обеспечивая адекватность предлагаемых моделей. Модели температурного дрейфа ВОГ представлены в работах [8-25]. Во всех перечисленных этих работах

¹ Научный руководитель: к.т.н, доцент, начальник отдела Колеватов А.П.

декларируются успешные результаты термокомпенсации, поэтому авторы настоящего доклада затрудняются рекомендовать какой-либо метод, а предлагают сосредоточиться на дефектах ВОГ, ухудшающих качество термокомпенсации.

Классификация дефектов ВОГ. Для расчета коэффициентов модели термокомпенсации использовались показания ВОГ (в составе БИНС), полученные на термопереходах при выполнении калибровки системы на наклонно-поворотных столах фирмы «Acutronic». Калибровка БИНС выполняется на статических температурах и термопереходах. Использовались термопереходы следующих типов:

- 1) переходы с изменением температуры на $20 \div 25^\circ\text{C}$ между калибровочными температурными точками, скорость изменения температуры в среднем составляет $2,5 \cdot 10^{-3} \div 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/сек}$;
- 2) переходы на $40 \div 70^\circ\text{C}$, дополнительные, скорость изменения температуры в среднем составляет $7,0 \cdot 10^{-3} \div 0,01 \text{ }^\circ\text{C/сек}$;
- 3) самопрогрев – запуск системы из холодного состояния и выдержка во включенном состоянии до выхода на стабильный температурный режим без внешних источников тепла/охлаждения, скорость изменения температуры составляет до $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/сек}$.

На термопереходах БИНС устанавливается в плоскость горизонта с заданным направлением относительно плоскости меридиана. Оценка теплового дрейфа производится путем осреднения исходных показаний ВОГ на 5-ти минутах методом скользящего среднего. Выбранное значение интервала осреднения показаний ВОГ установлено по результатам расчёта вариаций Д. Аллана выходных показаний исследуемой партии ВОГ [30]. Производная от температуры рассчитывается по показаниям термодатчика ВОГ. Выявленные дефекты оптических блоков по результатам термокомпенсации классифицированы по следующим группам:

- 1) изменение смещения нуля на установившейся температуре;
- 2) повышенная интенсивность шумовой составляющей дрейфа ВОГ;
- 3) S-образность теплового дрейфа ВОГ;
- 4) неправильная форма дрейфа (НФД) ВОГ;
- 5) опережение/запаздывание дрейфа относительно скорости изменения температуры;
- 6) наличие выбросов.

Вводится понятие контролируемого температурного дрейфа ВОГ, для которого величина допустимого остаточного дрейфа ограничивается диапазоном $\pm 0,03^\circ/\text{час}$.

Идентификация дефектов. Как правило, просмотр графиков с результатами испытаний изделия занимает много времени и является ручным и трудоёмким процессом. Поэтому в настоящей работе были предложены алгоритмы, позволяющие автоматически идентифицировать дефекты волоконно-оптического гироскопа при термокомпенсации. Для идентификации дефектов применяются методы статистической обработки измерений [31], с помощью которых формируются базовые шкалы и функции принадлежности для применения теории нечётких множеств [32]. Анализу были подвергнуты порядка 60 отчётов по термокомпенсации ВОГ. Результаты автоматической идентификации сравнивались с ручным разбором дефектов. Из исследуемой выборки полностью совпало с результатами визуального контроля примерно 72% отчётов, что демонстрирует эффективность предложенных методов идентификации. Заметим, что все описанные дефекты ВОГ не поддаются или мало поддаются алгоритмической термокомпенсации, однако могут указывать на определенные конструктивные или технологические дефекты чувствительных элементов ВОГ, что в дальнейшем сможет помочь разработчикам ВОГ понять причину возникновения дефектов и получить возможность их устранения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lefevre, H.C., The Fiber Optic Gyroscope, Boston, MA, USA, Artech House, 2014, p. 343.
2. W.K. Burns, P.F. Liao, P. Kelley. Optical fiber rotation sensing. Academic press, 1994, p. 390

3. Shupe D.M. Thermally induced non-reciprocity in the fiber-optic interferometer // *Applied optics* 1980, vol.19, No. 5, pp. 654–655. DOI: 10.1364/AO.19.000654
4. Mohr F., Schadt F. Bias error in fiber optic gyroscopes due to elasto-optic interactions in the sensor fiber. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5502, pp. 410–413. DOI: 10.1117/12.566654 Available at: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=848587>
5. Schadt F., Mohr F. Error signal formation in FOGs through thermal and elasto-optical environment influence on the sensing coil // *Proc. Inertial Sensors and Systems*. 2011. P. 2.1–2.13.
6. Hocker G.B. Fiber-optic sensing of pressure and temperature. *Appl. Opt.*, 1979, Vol. 18, No. 9, pp. 1445–1448. DOI: 10.1364/AO.18.001445
7. Ling W., Li X., Xu Z., Zhang Z., Wei Y. Thermal effects of fiber sensing coils in different winding pattern considering both thermal gradient and thermal stress. *Optics Communications*, 2015, vol. 356, pp. 290–295. DOI: 10.1016/j.optcom.2015.08.002.
8. IEEE Standard Specifying and Testing Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros, IEEE Std 952- 2020 (Revision of IEEE Std 952-1997)
9. **Джашитов В. Э., Панкратов В. М.** Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ „Электроприбор“, 2001. 150 с.
10. V. E. Dzhashitov, V. M. Pankratov, A. V. Golikov, S. G. Nikolaev, A. P. Kolevator, A. D. Plodnikov, K. V. Koffer. Hierarchical thermal models of FOG-based strapdown inertial navigation system. *Gyroscopy and Navigation*, July 2014, Volume 5, Issue 3, pp. 162–173.
11. **В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов, А.В. Голиков, С.Г. Николаев, А.П. Колеватов, А.Д. Плотников, К.В. Коффер.** Температурная калибровка бесплатформенной инерциальной навигационной системы по сигналам распределённых термодатчиков. Мехатроника, автоматизация, управление № 7, 2013 г., стр. 42–47.
12. **Джашитов В. Э., Панкратов В. М.** Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ „Электроприбор“, 2001. 150 с.
13. **А.П. Колеватов, С.Г. Николаев, А.Г. Андреев, В.С. Ермаков, О.Л. Кель, Д.И. Шевцов.** Волоконно-оптический гироскоп бесплатформенных инерциальных систем навигационного класса. Разработка, термокомпенсация, испытания. *Гироскопия и навигация* № 3(70) 2010 г., стр. 49–60.
14. Исследование зависимости выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа от температуры в составе бескарданного инерциального измерительного модуля // **Е.В. Драницына, Д.А. Егоров.** (<https://textarchive.ru/c-1987880.html>)
15. **Г.И. Емельянец, А.П. Степанов.** Интегрированные навигационные системы. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – 394.
16. Dranitsyna, E., Gontar, D.A., Compensation for the Temperature Dependence of the Fog Output Signal, *International Workshop Navigation and Motion Control (NMC 2021)*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022, vol. 1215 (2022), no. 012003, pp. 1–5.
17. **Есипенко И.А., Лыков Д.А.** Математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа и ее экспериментальная верификация // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2017. № 5. С. 31–46. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-5-31-46.
18. **Вахрамеев Е. И., Галягин К. С., Ивонин А. С., Ошивалов М. А., Ульрих Т. А.** Тепловой дрейф волоконнооптического гироскопа // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2011. Т. 54, № 1. С. 32–37.
19. **Вахрамеев Е. И., Галягин К. С., Ивонин А. С., Ошивалов М. А.** Прогноз и коррекция теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2013. Т. 56, № 5. С. 79–84
20. **Вахрамеев Е. И., Галягин К. С., Ошивалов М. А., Савин М. А.** Методика численного прогнозирования и коррекции теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2017. Т. 60, № 1. С. 32–38
21. **Фролов А.В., Михайлов Ю.В., Смирнов С.В.** Разработка и валидация методики моделирования теплового и деформированного состояния деталей бесплатформенной инерциальной навигационной системы. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2022, № 1 (138), с. 32–48. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-1-32-48>
22. Исследование и повышение точностных параметров волоконно-оптических гироскопов. / **А.С. Алейник.** Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург 2012. Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики на кафедре физики и техники оптической связи.
23. **Пылаев Ю.К.** Температурные возмущения бесплатформенной инерциальной навигационной системы с волоконно-оптическими гироскопами. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Институт проблем точной механики и управления РАН ООО НПП «Антарес», Саратов 2004. 263 с.
24. **Тарыгин Е.И.** Методика калибровки тепловой модели блока чувствительных элементов, состоящего из трёх датчиков угловой скорости. *Гироскопия и навигация*. Том 27. №4 (107), 2019. С. 88 – 102.
25. **Козлов А.В., Тарыгин И.Е., Голован А.А., Шаймарданов И.Х., Дзуев А.А.** Калибровка инерциальных измерительных блоков с оценкой температурных зависимостей по эксперименту с переменной температурой: результаты калибровки БИНС-РТ // XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. С. 225–228.

26. Никифоровский Д.А., Дейнека И.Г., Шарков И.А., Мешковский И.К. Метод компенсации температурного дрейфа волоконно-оптического гироскопа с использованием корреляционных связей между показаниями гироскопа и нескольких датчиков температуры. Гироскопия и навигация. Том 30. №2 (117), 2022. Стр 71-80.
27. Мешковский И.К., Рупасов А.В., Стригалева В.Е., Шарков И.А. (НИУ ИТМО, Санкт-Петербург, Россия) Исследование влияния тепловых воздействий на работу волоконно-оптического гироскопа. XXI Международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2014.
28. Климкович Б.В. Влияние случайной погрешности температурных датчиков на качество температурной компенсации смещения нуля ВОГ нейронной сетью // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №4 (111), С. 53–70. DOI 10.17285/0869-7035.0049.
29. Антонова М.В., Матвеев В.А. Модель погрешности волоконно-оптического гироскопа при воздействии тепловых и магнитных полей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2014. № 3. С. 73–80.
30. К вопросу оценки шумовых составляющих измерительного тракта по методу вариации Аллана / Д.А. Кутовой, О.И. Маслова, С.Ю. Перепелкина, А.А. Федотов // Гироскопия и навигация. – 2015. – № 2 (89). – С. 30–39.
31. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ФИЗМАТГИЗ. 2002. – 496 с.
32. Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф., В.Б. Силов, Тарасов В.Б., Поспелова Д.А. Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Книга по требованию, 2024. – 312 с.

Zlygosteva M. P., Kolevator A.P., Ulyanovskaya T.A., Sergeev A. M. (Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm), Ivshina Yu.V. (Perm Research National Polytechnic University, Perm). **Identification of thermal drift models of a fiber-optic gyroscope.**

Abstract. In this report, the models of temperature drift of a fiber-optic gyroscope are analyzed. The results of the study of fiber-optic gyroscope defects that manifest themselves when the ambient temperature changes are presented. It was found that the appearance of these defects worsens the efficiency of thermal compensation. According to the results of the study, a classification of these defects of the FOG is proposed, which allows to separate the inertial navigation systems created on their basis by accuracy classes. Methods have been developed for identifying models of the temperature drift of the FOG, including using fuzzy logic approach.

¹М.М. МУРЗАБЕКОВ, Д.С. БОБРОВ, В.П. ЛОПАТИН, Е.С. СКВОРЦОВ
(ФГУП «ВНИИФТРИ», р.п. Менделеево, Московская обл.)

ПОЛЕВОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ГРАВИ-МАГНИТНЫХ КАРТ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ

Представлен полевой геофизический комплекс, включающий измеритель уклонения отвесной линии и высокоточный относительный гравиметр для создания карт параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ), а также бортовой квантовый магнитометр и магнитовариационная станция для создания карт параметров магнитного поля Земли (МПЗ). Эти карты могут стать основой для систем автономной навигации по МПЗ и ГПЗ. Представлены карты, измеренные с использованием предлагаемого геофизического комплекса, и направления дальнейших исследований.

Введение. Составляющими комплексированных систем автономной навигации по магнитному и гравитационному полям Земли (МПЗ и ГПЗ) являются навигационная аппаратура потребителя (НАП) ГНСС, бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), бортовой измеритель и опорная навигационная карта параметров этих полей [1-6]. В такой системе навигации, когда внешние условия не влияют на работу НАП ГНСС, используется режим комплексирования «БИНС+НАП». В тех случаях, когда НАП не способна решать навигационную задачу, коррекция ухода показаний БИНС осуществляется по измерениям параметров МПЗ и ГПЗ. При этом опорная карта МПЗ и ГПЗ используется для определения текущего местоположения по результатам сравнения с данными измерений бортового измерителя.

Отдельно следует отметить, согласно работам [7, 8], что карты ГПЗ нужны и как источник корректирующей информации для БИНС. В этих работах выделено, что для перспективных БИНС погрешность определения параметров ГПЗ будет вносить весомый вклад в точность навигационного решения.

В работе представлен полевой геофизический комплекс, который позволяет создавать карты параметров ГПЗ и МПЗ, с ранее недостижимой точностью и дискретностью, которые могут использоваться при создании и испытании комплексированных систем автономной навигации.

Состав полевого геофизического комплекса. В состав геофизического комплекса входят: 1) *измерители параметров ГПЗ* – астроизмеритель уклонения отвесной линии [9] и высокоточный относительный гравиметр типа Scintrex CG-5 (рис. 1а); 2) *измерители параметров МПЗ* – бортовой квантовый магнитометр, размещенный на квадрокоптере и магнитовариационная станция (рис. 1б).



Рис. 1. Геофизический комплекс

¹ Научный руководитель – д.т.н., проф., Заслуженный деятель науки РФ, г.н.с. Фатеев В.Ф.

Результаты создания карт. Карты ГПЗ. Совместные измерения ускорения силы тяжести g (УСТ) и составляющих уклонения отвесной линии (УОЛ) ξ, η с использованием гравиметра и астроизмерителя выполнены на территории Московской области на полигоне с линейными размерами примерно 20x20 км. Полигон включает 32 точки со средним расстоянием примерно 4 км друг от друга, время измерений в каждой точке не превышает 1 ч.

Для создания карт УОЛ и АСТ создана равномерная сетка с шагом 100 м, включающая точки измерений. Интерполирование значений УОЛ и АСТ в точки равномерной сетки выполнено с использованием известного метода «удаления-восстановления», который позволяет учитывать влияние топографических масс и повысить точность создания карт [10].

Дополнительно по этим картам вычислены составляющие УСТ g_x, g_y и гравитационные градиенты T_{ij} [11]. На рис. 2 представлены примеры карт некоторых параметров ГПЗ.

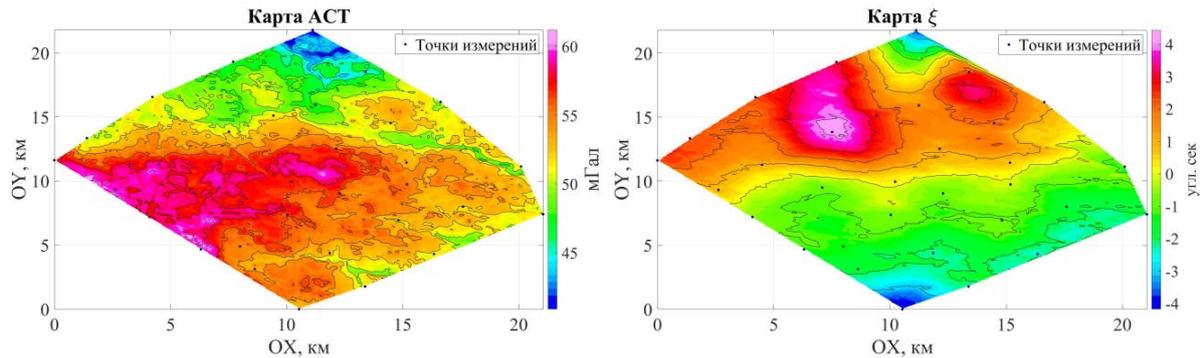


Рис. 2.

Карты МПЗ. Для создания карт аномальной составляющей индукции МПЗ измерения выполнялись галсами на высоте полета 150 м при расстоянии между галсами 200 м. В районе измерений располагалась магнитовариационная станция. Карта аномальной составляющей индукции МПЗ, созданная по результатам этих измерений, представлена на рис. 3а. Созданную карту МПЗ планируется использовать при испытании макета системы навигации, которая создается во ФГУП «ВНИИФТРИ». Макет включает вышеуказанные магнитометры и квадрокоптер, а также БИНС на МЭМС-датчиках (рис. 3б).

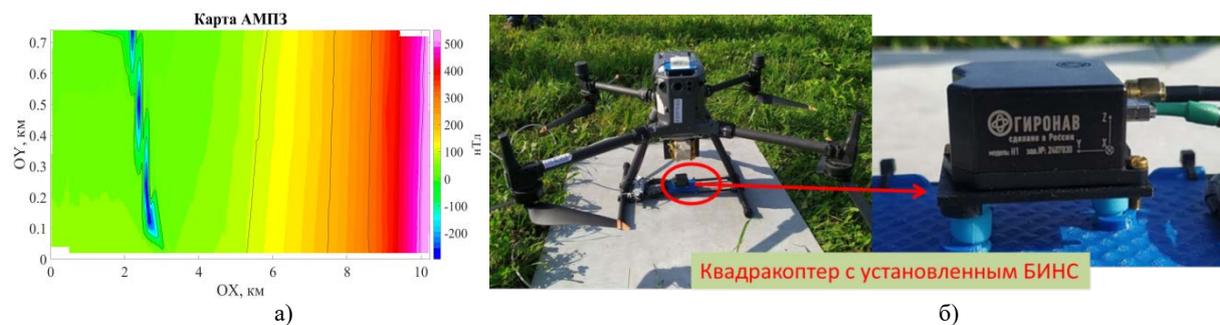


Рис. 3.

Заключение. В работе представлен геофизический комплекс, включающий измерители параметров ГПЗ и МПЗ. Данный комплекс позволяет создавать карты УСТ и АСТ, УОЛ, составляющих УСТ, гравитационных градиентов, а также карту аномальной составляющей МПЗ. Эти карты могут использоваться, в частности, при создании и испытании комплексированных систем навигации по ГПЗ и МПЗ.

Карта МПЗ, созданная с использованием комплекса, станет опорной при испытании разрабатываемого макета системы навигации.

Материал статьи подготовлен за счет гранта Российского научного фонда № 23-67-10007.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Денисенко О.В., Пустовойт В.И., Сильвестров И.С., Фатеев В.Ф.** Проблемы развития беспроводной ассистирующей технологии навигации в ГНСС ГЛОНАСС на основе измерений параметров геофизических полей // Альманах современной метрологии. 2020. № 4 (24). С. 127-160.
2. **Сафонова Т.В.** Экспериментальные исследования точностных характеристик корреляционно-экстремальных навигационных систем по магнитному полю Земли // Альманах современной метрологии. 2020. № 4(24). С. 86-96.
3. **Степанов О.А., Носов А.С.** Алгоритм коррекции навигационной системы по данным карты и измерителя, не требующий предварительного оценивания значений поля вдоль пройденной траектории // Гирскопия и навигация. 2020. Том 28, №2 (109). С. 70-90. DOI 10.17285/0869-7035.0029
4. **Canciani, A.J., Raquet, J.F.** Airborne Magnetic Anomaly Navigation // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2017. Vol. 53, no. 1. P. 67–80. DOI: 10.1109/TAES.2017.2649238. V. G. Peshekhonov and O. A. Stepanov (eds.) «Methods and Technologies for Measuring the Earth's Gravity Field Parameters» // Earth Systems Data and Models 5, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-11158-7>.
5. **H. Liu et al.**, «Comprehensive Features Matching Algorithm for Gravity Aided Navigation» // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 19, pp. 1-5, 2022, Art no. 1505305, doi: 10.1109/LGRS.2022.3192408.
6. **V. G. Peshekhonov and O. A. Stepanov** (eds.) «Methods and Technologies for Measuring the Earth's Gravity Field Parameters» // Earth Systems Data and Models 5, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-11158-7>.
7. **Попадёв В.В., Сорока А.И., Полубехин А.И.** и др. Возможности коррекции инерциальных навигационных систем на основе гравиметрических карт земли // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 222. С. 90-97.
8. **Пешехонов В.Г.** Проблема уклонения отвесной линии в высокоточной инерциальной навигации // Гирскопия и навигация. 2020. Том 28, № 4 (111). С. 3-15. DOI 10.17285/0869-7035.0046
9. **Мурзабеков М.М., Фатеев В.Ф., Юзефович П.А.** Измерения уклонений отвеса на известной московской аттракции с помощью цифрового астроизмерителя // Астрономический журнал. 2020. Т. 97, № 10. С. 873-880. DOI: 10.31857/S0004629920100059
10. **Meng Y., Hirt C., Pail R.** TGF: A New MATLAB-based Software for Terrain-related Gravity Field Calculations // Remote Sensing. 2020. 12. 1063. DOI: 10.3390/rs12071063
11. **Огородова Л.В.** Нормальное поле и определение аномального потенциала. Москва: МИИГАиК. 2010. С. 106.

М.М. Murzabekov, D.S. Bobrov, V.P. Lopatin, E.S. Skvortsov (FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo settlement, Moscow region, Russia). **Field geophysical complex for creating navigation gravity-magnetic maps for autonomous navigation systems**

Abstract. The paper presents a field geophysical complex, including a plumb line deviation meter and a high-precision relative gravimeter for creating maps of the Earth's gravity field (EGF) parameters and an onboard quantum magnetometer and a magnetovariation station for creating maps of the Earth's magnetic field (EMF) parameters. These maps can become the basis for autonomous navigation systems by EMF and EGF. The maps measured using the proposed geophysical complex and directions for further research are presented.

Д. Г. АРСЕНЬЕВ, А. Е. МИСНИК, М.А. ШАЛУХОВА
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,
Белорусско-Российский университет, Могилев)

УПРАВЛЕНИЕ РЕАБИЛИТАЦИЕЙ ПАЦИЕНТОВ В МЕДИЦИНСКИХ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Рассматривается метод управления реабилитацией пациентов в медицинских киберфизических системах основанный на использовании искусственного интеллекта. Для создания цифровой модели опорно-двигательного аппарата применяются технологии компьютерного зрения и траекторного анализа полученных точек. Индивидуализируя рекомендации, метод способствует повышению эффективности лечения пациентов.

Введение. Медицинские киберфизические системы представляют собой особый класс киберфизических систем, интегрирующих физические компоненты и вычислительные технологии для повышения качества медицинского обслуживания. Эффективное управление процессами в современных медицинских киберфизических системах, в том числе и в области реабилитации пациентов, требует интеграции передовых технологий и методов, а также индивидуального подхода к каждому пациенту. Среди ключевых проблем создания и внедрения классических систем управления, выделяется сложность интеграции в рабочий процесс, последующей технической поддержки и актуализации знаний, ограниченная применимость систем, основанных на статистической обработке данных [1-3].

Предлагаемый доклад посвящен методу управления процессом реабилитации пациентов в медицинских киберфизических системах. Рассматривается способ создания цифровой модели опорно-двигательного аппарата, анализ которой позволит повысить точность прогноза хода восстановления. Предложенный подход улучшает доступность и эффективность лечения, а также снижает нагрузку на медицинский персонал.

Управление процессом реабилитации в медицинских киберфизических системах. Совместно с Федеральным государственным бюджетным учреждением «Федеральный центр травматологии, ортопедии и эндопротезирования» Министерства здравоохранения Российской Федерации (г. Смоленск), специализирующемся на оказании высокотехнологичной медицинской помощи больным с заболеваниями опорно-двигательного аппарата, разработана киберфизическая система реабилитации пациентов после эндопротезирования суставов. Реализация онтологического подхода к разработке системы осуществлена с помощью модуля онтологического инжиниринга программно-инструментальной среды на основе мета-ассоциативного графа, включающего процессные составляющие в виде методов и событий [4]. Разработанная система предполагает использование мобильных устройств, оснащенных камерой (планшет или мобильный телефон) для получения видеоряда, и их взаимодействие с серверным модулем системы, отвечающим за анализ полученных данных.

Предлагаемый подход к управлению реабилитацией основан на использовании технических и программных средств, применяемых для создания и последующего анализа цифровой модели опорно-двигательного аппарата человека. Применение комплексной оценки, сочетающей качественные и количественные методы, позволяет всесторонне исследовать процесс изменения состояния опорно-двигательного аппарата и обеспечить корректное функционирование разработанной системы. Для используемого метода функциональной диагностики используется учёт кинематических параметров, позволяющих определить особенности и форму движений, отслеживание и запись данных о соответствии положения опорных точек тела при выполнении восстановительных упражнений [3-7].

Получение координат исходных точек положения сустава в пространстве осуществляется с помощью покадрового анализа видеоряда тестового движения: для определения угла, методикой функциональной диагностики выделяются опорные точки, затем, в зависимости от тестируемого узла, определяются вектора связи. В результате получаемой измерительной информа-

цией можно считать положение опорных точек тела человека, углы сгибания его суставов, полученных после обработки видеоряда. Каждый извлеченный кадр пропускается через предварительно обученную конволюционную нейронную сеть EfficientNet, извлекающую признаки для каждого кадра, являющимися числовыми представлениями важных аспектов изображения, характеризующих физические особенности объектов. Признаки агрегируются по всем кадрам для формирования цифровой модели опорно-двигательного аппарата пациента, которая хранится в базе данных интеллектуальной системы поддержки принятия решений.

Полученные данные о состоянии опорно-двигательного аппарата пациента объединяются с информацией его профиля, для дальнейшего обработки и выявления, с помощью рекуррентной LSTM-модели, закономерностей между физическими особенностями, выполнением рекомендаций и эффективностью индивидуальных планов реабилитации. Кластеризация данных, исходя функционального состояния опорно-двигательной системы, позволяет получить более точный прогноз восстановления для пациентов со схожими особенностями. На основе полученных кластеров составляется и обновляется план реабилитации в соответствии с индивидуальной траекторией восстановления [8].

Оценивая степень совпадения индивидуального плана реабилитации, полученного в ходе цифрового моделирования и фактических результатов, рассматривали группы пациентов, прошедших эндоскопическую замену коленного сустава, и проходивших восстановительный период с использованием прототипа системы поддержки принятия решений (n=46) и без него (n=34). Разработанная система показала хорошую прогностическую способность: соответствие либо опережение построенной системой траектории реальному ходу реабилитации наблюдалось в 89,1% случаев (в группе, проходящих реабилитацию на основе общих рекомендаций 64,1%). Для объективной оценки продолжается сбор данных о ходе восстановления пациентов, однако уже на текущем этапе специалисты-реабилитологи отмечают положительное влияние использования прототипа системы поддержки принятия решения, благодаря повышению степени осведомленности о функциональном состоянии опорно-двигательного аппарата и непосредственным вовлечением пациента в процесс реабилитации.

Способности систем, разрабатываемых на основе искусственного интеллекта, к управлению и контролю рекомендаций в квази-реальном времени, их адаптации и модификации в соответствии с текущим состоянием пациента, является важным преимуществом, позволяющим создать персонализированную траекторию восстановления и эффективный план дальнейшего лечения.

Заключение. Полученные результаты подтверждают значительный потенциал применения разработанной системы в клинической практике. По мере накопления данных, система будет продолжать совершенствоваться, обеспечивая более точные и эффективные вмешательства в управление процессами, что откроет новые возможности для дальнейшего развития и интеграции дополнительных функциональных возможностей. Дальнейшее развитие и адаптация системы не только улучшат качество реабилитационного процесса, но и существенно сократят экономические издержки, связанные с длительным лечением и реабилитацией пациентов. Дальнейшая работа проводится в нескольких направлениях: расширение функциональности системы путем интеграции новых модулей виртуальной и дополненной реальности для построения визуального образа цифровой модели пациента, а также совершенствовании алгоритмов машинного обучения для анализа больших данных и повышение точности получаемых прогнозов наиболее эффективной стратегии и срока реабилитации.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ
(проект № FSWF-2023-0012)*

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурдуковский, В. Н., Чудесова Г. П., Актуальные вопросы использования медицинских киберфизических систем / В. Н. Бурдуковский, Г. П. Чудесова // Стратегии и инструменты управления экономикой: отраслевой и региональный аспект : Материалы IX Международной науч-практической конференции, Санкт-Петербург, 15 мая 2020 года / Под общей редакцией В.Л. Василёнка. – Санкт-Петербург: Национальный исследовательский

- университет ИТМО, Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственное объединение пожарной безопасности автоматизированные системы", 2021. – С. 5-9. – EDN QDCDLB.
2. **Levonevskiy D., Motienko A.** "Using Mobile Applications for Patient Monitoring in Smart Medical Wards," 2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 833-837, doi: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694098.
 3. **He, S., Meng, D., Wei, M.** [et al.] Proposal and validation of a new approach in tele-rehabilitation with 3D human posture estimation: a randomized controlled trial in older individuals with sarcopenia. *BMC Geriatr* 24, 586 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12877-024-05188-7>
 4. **Мисник, А. Е.** Применение метаграфов для онтологического инжиниринга сложных систем / А. Е. Мисник // Прикладная информатика. – 2022. – Т. 17, № 2(98). – С. 120-132. – DOI 10.37791/2687-0649-2022-17-2-120-132. – EDN ITHLHC.
 5. **Кустова, А. В., Хозяинова С. С., Абусева Г. Р.** [и др.] Реабилитационные технологии у пациентов после тотального эндопротезирования крупных суставов нижних конечностей: наукометрический анализ / О. В. Кустова, С. С. Хозяинова, Г. Р. Абусева [и др.] // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. – 2024. – Т. 101, № 1. – С. 54-61. – DOI 10.17116/kurort202410101154. – EDN FUCCWZ.
 6. **Намазов, А. К., Намазов, К. А.** Физическая реабилитация как важнейший компонент в системе медицинской реабилитации / А. К. Намазов, К. А. Намазов // Здоровье - основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2019. – Т. 14, № 2. – С. 903-907. – EDN CEHQUN.
 7. **Wang, J., Qiu, K., Peng, H., Fu, J., & Zhu, J.** (2019). AI coach: Deep human pose estimation and analysis for personalized athletic training assistance. In Proceedings of the 27th ACM international conference on multimedia, 374-382. <https://doi.org/10.1145/3343031.3350910>
 8. **Arseniev D. G., Borisov V. V., Misnik A. E., Gomzhina E. A. and Shalukhova M. A.,** "Intelligent Synthesis of Individual Rehabilitation Plans for Patients after Joint Endoprosthesis Based on Computer Vision Technologies," 2024 7th International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/Inforino60363.2024.10552027.

D.G. Arseniev, A.E. Misnik, M.A. Shalukhova (Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", Mogilev). **Management of patient rehabilitation in medical cyberphysical systems**

Abstract. The method of patient rehabilitation management in medical cyberphysical systems based on the use of artificial intelligence is considered. To create a digital model of the musculoskeletal system, computer vision technologies and trajectory analysis of the obtained points are used. By individualising recommendations, the method contributes to improving the effectiveness of patient treatment.

Е.В. ЛУКОЯНОВ, Е.В. ДРАНИЦЫНА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОВЫШЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ КОМПЛЕКСОВ С РЕЗЕРВИРОВАННЫМИ БЕСПЛАТФОРМЕННЫМИ ИНЕРЦИАЛЬНЫМИ НАВИГАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

Приводится сравнение эффективности трех алгоритмов повышения отказоустойчивости комплексов с резервированными бесплатформенными инерциальными навигационными системами (БИНС). Предлагаемые алгоритмы основаны на методе попарных разностей и различных его модификациях. Сравнение алгоритмов осуществляется путем полунатурного моделирования, в рамках которого к экспериментальным данным добавляются смоделированные отказы.

Введение. Как и любая техника, БИНС подвержены отказам и могут выдавать навигационное решение с погрешностями, значительно превышающими заявленные точности. Это может быть вызвано аппаратными или программными отказами, а также условиями эксплуатации, отличающимися от определенных для этих систем. Для того чтобы повысить уровень отказоустойчивости комплексов на базе БИНС [1, 2], необходимо внедрять методы обнаружения, поиска и устранения отказов [3-7].

Методы обнаружения и поиска отказов БИНС могут быть реализованы на уровне инерциальных датчиков, либо на комплексном уровне [8]. На уровне датчиков можно выделить следующие методы: проверка на превышение диапазонов измеряемых величин, основанная на предполагаемой динамике движения объекта; контроль целостности посредством прямых проверок согласованности между собой величин, рассчитанных на основе различных комбинаций измерений, или с моделью движения объекта. Различные методы обнаружения и поиска отказов не являются взаимоисключающими и часто комбинируются.

В случае обнаружения неисправности инерциального датчика дальнейшее использование его выходных данных невозможно. Если нет резервных инерциальных датчиков, это означает отказ БИНС в целом. Поэтому для повышения отказоустойчивости на комплексном уровне зачастую используется резервирование БИНС [9]. При резервировании БИНС, как правило, используется схема из трех однотипных систем, а отказавшая система определяется путем сравнения попарных разностей вырабатываемых одноименных навигационных параметров. В результате БИНС с отказом исключается из контура выработки комплексного навигационного решения. Такой подход используется не только в морской навигации, но и в авиации [10-12] и в спутниковых навигационных системах [13, 14].

Целью работы является сравнение эффективности трех методов обнаружения отказов БИНС, вызванных аномальными показаниями инерциальных датчиков при использовании троированной системы. Предложенные методы основаны на анализе попарных разностей (ПР) для параметров, измеряемых инерциальными датчиками, а именно:

- обнаружение по взвешенной сумме ПР;
- обнаружение с применением адаптивного порога для ПР;
- обнаружение с применением адаптивного порога для главным компонент [15] ПР.

Постановка задачи обнаружения и поиска отказов. По сравнению с существующими алгоритмами, в которых задача обнаружения отказов решается на комплексном уровне, а именно, используются непосредственно значения выходных навигационных и динамических параметров БИНС, в работе предлагается реализовать поиск отказов на уровне датчиков, что снизит время, прошедшее от возникновения отказа до его обнаружения. Кроме того, такой подход позволит заменить недостоверные измерения датчиков используя их избыточность, и тем самым обеспечить изоляцию отказов и бесперебойность выдачи навигационного решения.

Измерения, используемые для решения задач диагностики резервированной системы, представляют собой составной вектор выходных сигналов однотипных датчиков разных БИНС,

например, акселерометров, гироскопов или датчиков температуры:

$$S_i = [X_{1,i} \ Y_{1,i} \ Z_{1,i} \ X_{2,i} \ Y_{2,i} \ Z_{2,i} \ X_{3,i} \ Y_{3,i} \ Z_{3,i}]^T, \quad (1)$$

где $X_{r,i}$, $Y_{r,i}$, $Z_{r,i}$ – сигнал r -ой БИНС ($r=1$ – основная, $r=2$, $r=3$ – резервные) по соответствующей измерительной оси в i -й момент времени.

Требуется решить задачу обнаружения факта наличия отказа в i -й момент времени и определить номер датчика, данные которого недостоверны.

Экспериментальные данные. Сравнение алгоритмов проводилось путем полунатурного моделирования работы трех БИНС в условиях вибрирующего неподвижного основания. Далее к полученным данным добавлялись смоделированные отказы. В частности, был смоделирован класс многократных (длительностью от 1 до 5 тактов) аддитивных отказов среднего и низкого уровней, возникающих в произвольные моменты времени в показаниях гироскопов, по разным осям в трех однотипных БИНС. Амплитуда отказов задавалась случайным образом в диапазоне от 100 до 1000 °/ч.

Краткая характеристика сравниваемых алгоритмов. Первый алгоритм основан на анализе *взвешенной суммы попарных разностей* для величин, измеряемых инерциальными датчиками вдоль одноименных осей. Для каждого измерения S_i рассчитывается вектор попарных разностей, после чего находится взвешенная сумма его компонент отнесенная к средней дисперсии компонент вектора S_i (считается, что она идентична для датчиков установленных по разным осям и в разных системах). Функция принятия решения о появлении отказа в этом случае достаточно проста, если значение суммы превышает некоторого, заранее определенного порога (с привлечением экспертных данных о системе), то в системе присутствует отказ.

Во втором алгоритме, в отличие от первого для каждой попарной разности *порог срабатывания рассчитывается индивидуально*, что позволяет повысить чувствительность алгоритма к отказам. Для определения факта наличия отказа достаточно определить превышение индивидуального порога хотя бы по одной из попарных разностей.

Третий алгоритм является в определенной степени вариацией второго подхода в части формирования адаптивного порога обнаружения. Отличие заключается в том, что при вычислении порогового значения в качестве параметра теперь используются не сами значения попарных разностей, а их *преобразования к главным компонентам*. Для определения факта наличия отказа достаточно определить превышение индивидуального порога хотя бы по одной из главных компонент попарных разностей.

Сравнительный анализ работы алгоритмов. Для каждого алгоритма производился расчет матрицы ошибок (confusion matrix), являющейся классической в задачах бинарной классификации [16], частным случаем которой является и задача обнаружения отказов.

Анализ результатов моделирования показал, что алгоритмы, использующие адаптивный порог, обладают большей полнотой обнаружения в случае отказов малого и среднего уровня (~ 30-55 %), тогда как классический метод попарных разностей обеспечивает решение задачи на уровне (~ 2-37%). Для больших по уровню отказов все алгоритмы показали примерно одинаковый результат (~ 99-100%). Для задачи поиска отказавшего датчика рассчитывались аналогичные метрики, которые показали 100 % результат во всех экспериментах. Отсюда следует, что для решения задач диагностирования на высоком уровне требуется обеспечить в первую очередь решение задачи обнаружения малых по уровню отказов, при этом решение задачи поиска отказов после этапа обнаружения уже не вызывает затруднений.

Заключение. Проведен сравнительный анализ эффективности трех алгоритмов повышения отказоустойчивости комплексов с резервированными БИНС, основанных на сравнении попарных разностей параметров, измеряемых инерциальными датчиками. Сравнение методов проводилось путем полунатурного моделирования работы трех БИНС в одинаковых условиях при создании различных отказов в показаниях инерциальных датчиков. По приведенным результа-

там моделирования можно сделать вывод, что наиболее трудоемкими для обнаружения являются малые по амплитуде отказы, в этом случае методы с адаптивным порогом решают эту задачу эффективнее. Одним из возможных направлений исследований является комплексирование предложенных алгоритмов при решении задач обнаружения и поиска отказов инерциальных датчиков для получения наибольшей эффективности.

Работа проводилась при поддержке гранта РФ №23-79-10071,
<https://rscf.ru/project/23-79-10071/>

ЛИТЕРАТУРА

1. IMO Resolution MSC.252(83). Adoption of the revised performance standards for integrated navigation systems (INS).
2. Standard IEC 61924-2:2021. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems - Integrated navigation systems (INS) - Part 2: Modular structure for INS - Operational and performance requirements, methods of testing and required test results.
3. Chen J., Patton R. J. Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems. – Springer Science & Business Media, 2012. – Т. 3.
4. Дмитриев С. П., Колесов Н. В., Осипов А. В. Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. – СПб: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2003. – 206 с.
5. Колесов Н.В., Толмачева М.В., Юхта П.В. Системы реального времени. Планирование, анализ, диагностирование. – СПб: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. – 185 с.
6. Wang R., Xiong, Z., Liu, J., Xu, J., Shi, L. Chi-square and SPRT combined fault detection for multisensor navigation //IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2016. – Т. 52. – №. 3. – С. 1352-1365.
7. Koshayev D. A. Kalman filter-based multialternative method for fault detection and estimation //Automation and Remote Control. – 2010. – Т. 71. – №. 5. – С. 790-802.
8. Groves P. D. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems, [Book review] // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2015. – Т. 30. – №. 2. – С. 26-27.
9. Dubrova E. Hardware redundancy //Fault-Tolerant Design. – 2013. – С. 55-86.
10. Земляной Е. С., Тектов М. В. Кворум-элемент для определения параметрического отказа курсовертикалей //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – №. 6. – С. 104-109.
11. Dai, Y., Lai, J., Zhang, Q., Li, Z., Shen, Y. An Improved Fault Detection and Isolation Method for Airborne Inertial Navigation System/Attitude and Heading Reference System Redundant System // Aerospace. – 2023. – Т. 10. – №. 12. – С. 1024.
12. М. Слим, М. Сайед, Х. Мазех, Х. Шрайм, К. Франсис. Отказоустойчивое управление групповым полетом мультикоптеров // Гироскопия и навигация. Том 29. №2 (113), 2021. С.78-96.
13. Humphreys T. E., Ledvina, B. M., Psiaki, M. L., O'Hanlon, B. W., Kintner, P. M. Assessing the spoofing threat: Development of a portable GPS civilian spoofer //Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008). – 2008. – С. 2314-2325.
14. Веремеенко К. К., Антонов Д. А. Обнаружение сбоев спутниковых навигационных систем в интегрированной навигационной системе //XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2016. – С. 497-500.
15. Abdi H., Williams L. J. Principal component analysis //Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics. – 2010. – Т. 2. – №. 4. – С. 433-459.
16. Li, B., Wang, H., Mu, L., Shi, Z., & Du, B. A configuration design method for a redundant inertial navigation system based on diagnosability analysis //Measurement Science and Technology. – 2020. – Т. 32. – №. 2. – С. 025111.

E.V. Lukoyanov, E.V. Dranitsyna (CSRI Electropribor, ITMO University, Saint-Petersburg). **Comparison of Algorithms for Increasing the Fault Tolerance of Complexes with Redundant Strapdown Inertial Navigation Systems**

Abstract. A comparison of the effectiveness of three algorithms for increasing fault-tolerance of complexes with redundant strapdown inertial navigation system (SINS) is made. The proposed methods are based on the paired difference calculation and its various modifications. Comparison of methods is carried out through semi-natural simulation, in which artificial faults are added to the data obtained under conditions of a stationary base.

Ю.А. ЛИТВИНЕНКО, О.А. СТЕПАНОВ
(ЦНИИ "Электроприбор", Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ФЕДЕРАТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В НЕРЕКУРРЕНТНЫХ СХЕМАХ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассматриваются особенности децентрализованной обработки измерительной информации, предполагающей получение искомой оценки вектора состояния динамической системы путем взвешивания оценок, сформированных с помощью частных фильтров в распределенных измерителях (измерительных модулях). Приводятся условия, обеспечивающие совпадение вырабатываемых таким образом оценок и расчетных матриц ковариаций с результатами, вырабатываемыми в оптимальном централизованном фильтре Калмана. Полученные результаты поясняются на методическом примере оценивания винеровской последовательности.

Известно, что задача построения алгоритмов оценивания состояния динамической системы при наличии избыточности измерений, может быть решена как на основе централизованной обработки, когда все доступные измерения поступают в единый централизованный фильтр, так и на основе различных децентрализованных схем, или так называемых алгоритмов федеративной фильтрации (ФФ) [1-4].

Основное достоинство централизованной схемы заключается в возможности получения оптимальной в среднеквадратическом смысле оценки при решении задачи оценивания линейной системы с использованием линейных измерений и гауссовском характере порождающих шумов и ошибок измерения. Это достигается за счет централизованной обработки всех измерений с помощью оптимального фильтра Калмана, рекуррентно обрабатывающего весь набор измерений. При сравнении централизованных схем с методами ФФ в качестве недостатков централизованных схем обычно отмечают меньшую надежность и большую вычислительную нагрузку.

Суть методов федеративной фильтрации заключается, в том, что первичная обработка информации производится в так называемых частных фильтрах (ЧФ), в которых по измерениям, полученным в отдельных измерительных модулях, вырабатываются частные оценки состояния динамической системы. Комплексная оценка рассчитывается путем осреднения частных оценок в так называемом блоке безынерционного осреднения. К основным достоинствам алгоритмов ФФ обычно относят меньшую вычислительную нагрузку по сравнению с централизованным фильтром Калмана и их устойчивость к ложным измерениям, полученным в одном из измерительных модулей [1]. Алгоритмы ФФ в последнее время широко применяются при решении задач оценивания на основе данных от распределенных измерителей, в частности применительно задачам групповой навигации необитаемых аппаратов [7-10]. Особенности рекуррентных алгоритмов ФФ и их применения к обработке навигационной информации наиболее подробно рассмотрены в работе [1]. Дальнейшему развитию таких алгоритмов посвящены работы [2,4-6], в которых показывается возможность обеспечения так называемых гарантирующих свойств ФФ, суть которой заключается в том, что действительная погрешность комплексной оценки не превышает расчетной погрешности, полученной в блоке безынерционного осреднения. К основному недостатку ФФ можно отнести тот факт, что в общем случае эти алгоритмы не обеспечивают получение оптимальных оценок, а характеристика точности, рассчитываемая в блоке безынерционного осреднения, не является действительной ковариационной матрицей ошибки вырабатываемой оценки. Хотя, для некоторых частных случаев и сформулированы условия так называемой согласованной настройки частных фильтров, при которой можно добиться получения в блоке безынерционного осреднения оптимальной оценки [2,4], общего ответа на вопрос об условиях, обеспечивающих совпадение оценок и расчетных матриц ковариаций, вырабатываемых в ФФ, с результатами, вырабатываемыми в оптимальном централизованном фильтре Калмана, авторам не известно.

Следует подчеркнуть, что упомянутые выше алгоритмы являются рекуррентными по отношению к поступающим измерениям. Вместе с тем в последнее десятилетие возрос интерес и к нерекуррентным методам обработки, в том числе алгоритмам, основанным на использовании

методов фактор-граф оптимизации (Factor-graph optimization - FGO) [11-12]. В ряде работ показывается преимущество нерекуррентных схем по сравнению с традиционным рекуррентным алгоритмом, например, фильтром Калмана. Однако, к настоящему времени методы ФФ исследованы только применительно к традиционным рекуррентным схемам обработки поступающих измерений, а возможные преимущества нерекуррентных ФФ в литературе не рассмотрены. В этой связи, целью предлагаемой работы является исследование особенностей методов федеративной фильтрации при реализации нерекуррентных схем обработки измерений.

В докладе формулируются постановка задачи оценивания неизвестного случайного вектора x при обработке измерений, поступающих от m измерителей. Приводится решение задачи фильтрации при использовании единого централизованного фильтра, обеспечивающего получение оптимальной оценки и федеративного фильтра, включающего m частных фильтров. Для обоих вариантов построения фильтра рассматривается рекуррентная и нерекуррентная схема решения. Применительно к традиционной рекуррентному ФФ формулируются условия согласованной настройки ЧФ, при этом отмечается, что, в большинстве задач оценивания они не обеспечивают оптимальное решение. Так же приводятся условия согласованной настройки для федеративного фильтра, построенного по нерекуррентной схеме обработки, но при этом доказываем, что они обеспечивают совпадение оценок и ковариационных матриц оценок ФФ и централизованного (оптимального) фильтра в общем случае.

В качестве иллюстрации приводится пример оценивания винеровской последовательности процесса по измерениям, производимым в двух измерительных модулях. Для рассматриваемого примера сравниваются условия настройки ЧФ для рекуррентной и нерекуррентной схем обработки измерений. Показывается, что для обеспечения оптимальной оценки ФФ при рекуррентной обработке, необходимо соблюдение условий настройки ЧФ, требующих, дополнительного учета дисперсий шумов измерений, тогда как для нерекуррентной схемы, в условиях настройки ЧФ дополнительный учет дисперсий шумов измерений не требуется.

Таким образом, в работе исследованы особенности нерекуррентного ФФ в сравнении с традиционной рекуррентной схемой обработки. Показано важной отличие нерекуррентного федеративного фильтра, заключающиеся в возможности получения оптимальной оценки вектора состояния, тогда как для рекуррентной схемы обработки, методы федеративной фильтрации обеспечивают оптимальное оценивания только для частных случаев.

*Работа подготовлена при поддержке гранта РФФИ 23-19-00626,
<https://rscf.ru/project/23-19-00626/>.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Carlson N.A. Federated Filter for Fault-Tolerant Integrated Navigation Systems //AGARDograph 331, Aerospace Navigation Systems, June 1995.p. 265-280.
2. Тупышев В.А., Методы синтеза алгоритмов фильтрации с гарантированным качеством оценивания параметров в задачах обработки навигационной информации //диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук.СПб, 2011.
3. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 2. Введение в теорию оценивания.-СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2012. 417 с.
4. V.A. Tupysev and Yu.A. Litvinenko, The Effect of the Local Filter Adjustment on the Accuracy of Federated Filters”, Proc. of MICNON-2015, pp. 349-354, 2015.
5. Zhang H, Lennox B, Goulding PR, Wang Y (2002) Adaptive information sharing factors in federated Kalman filtering In: The 15th IFAC World Congress, Barcelona, Spain, July 21–26, pp 664–664
6. Селезнева М.С., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Чжан Л. Модификация федеративного фильтра калмана с помощью критерия степени наблюдаемости переменных состояния. В сборнике: XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. 2019. С. 53-56.
7. A. Maier, S. Kiesel, G.F. Trommer, Performance Analysis of Federated Filter for SAR/TRN/GPS/INS Integration, Gyroscopy and Navigation, vol. 2, no. 4, pp. 293-300, 2011.
8. Weiwei Lyu, Xianghong Cheng, and Jinling Wang . Adaptive Federated IMM Filter for AUV Integrated Navigation Systems. Sensors 2020, 20, doi:10.3390/s20236806
9. Pengfei Zhang, Zhenhua Ma, Yin He, Yawen Li, and Wenzheng Cheng. Cooperative Positioning Method of a Multi-UAV Based on an Adaptive Fault-Tolerant Federated Filter. Sensors 2023, 23, <https://doi.org/10.3390/s23218823>
10. Tarik Ayabakan, Feza Kerestecioglu. Fault Tolerant Indoor Positioning Based on Federated Kalman Filter. Journal of Signal Processing Systems,2024 ,273–285

11. Weisong Wen, Tim Pfeifer, Xiwei Bai Li-Ta Hsu. Factor graph optimization for GNSS/INS integration: A comparison with the extended Kalman filter. NAVIGATION. 2021;68:315–331
12. О.А. Степанов, А.М. Исаев, А.В. Моторин, Ю.А. Литвиненко, В.П. Золотаревич Рекуррентные и нерекуррентные алгоритмы в задачах обработки навигационной информации. Отличия и взаимосвязь с алгоритмами оптимизации на графах. Сборник трудов XXXI Санкт-петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам , 2024,с. 336-344.

Yu. A. Litvinenko, O. A. Stepanov (Concern CSRI Elektropribor, ITMO University, St. Petersburg, Russia). **The Features of Federated Filtering Methods in Nonrecursive Measurement Processing**

Abstract. The paper discusses the features of decentralized processing of measurement information, which is aimed to obtain the desired estimate of the state vector of a dynamic system by weighing the local estimates generated in distributed measuring modules. The recursive and non-recursive schemes of measurements processing in federated filters are compared. Conditions for recursive and non-recursive schemes are considered that ensure the coincidence of the estimates and calculated covariance matrices generated in federated filters and the optimal centralized Kalman filter. A methodical example of the Wiener sequence estimation is given to illustrate the methods under consideration.

УДК 629.78

М. А. ПОНОМАРЕВА, А. В. КРАМЛИХ
(Самарский университет им. Королева, Самара)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО ОДНОМОМЕНТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

В работе приведено сравнение наиболее распространенных алгоритмов определения ориентации космического аппарата по одномоментным измерениям различной физической природы по следующим критериям: быстродействие алгоритма, точность работы и тип выходной информации.

Введение. Информация об угловом положении космического аппарата (КА) используется для привязки измерений, проводимых целевой аппаратурой, и в контуре обратной связи системы управления угловым движением КА. Существует множество алгоритмов для определения ориентации КА. В данной работе рассматриваются алгоритмы использующие одномоментные измерения, которые позволяют определить ориентацию по двум и более векторным измерениям, полученным одновременно (или с пренебрежимо малой задержкой между измерениями). Такие алгоритмы просты, не требуют априорной информации о положении КА, имеют высокое быстродействие, однако невысокую точность. Предлагаемый доклад посвящен исследованию и сравнению ряда наиболее часто используемых алгоритмов по одномоментным измерениям.

Математическая постановка задачи. Задача определения ориентации КА заключается в определении углового положения связанной с КА системы координат (СК) относительно некоторой опорной СК, например, орбитальной СК, по имеющимся измерениям в связанной СК и моделям этих измерений в орбитальной СК. Угловое положение связанной СК относительно орбитальной СК описывается матрицей поворота \mathbf{M} , которая может быть параметризована углами Эйлера или кватернионом [1].

Формула связи измерений и моделей этих измерений:

$$\mathbf{b}_i = \mathbf{M} \cdot \mathbf{r}_i, \quad (1)$$

где: \mathbf{b}_i – вектора измерений ($i = \overline{1, N}$, N - количество единичных векторов измерений в связанной СК); \mathbf{r}_i – вектора моделей измерений в орбитальной СК; \mathbf{M} – матрица поворота.

Таким образом задача сводится к нахождению матрицы поворота \mathbf{M} .

В данной работе проводится исследование следующих алгоритмов по одномоментным измерениям: TRIAD [2-4], Optimized TRIAD [5], q-method [4,6,7], QUEST [3,4,7], ESOQ [4,7], ESOQ2 [4,7], SVD [4,7].

Результаты исследования. Для сравнения алгоритмов было проведено математическое моделирование в Matlab при следующих условиях.

Углы ориентации задавались случайным образом и вычислялась истинная матрица поворота.

Компоненты векторов в орбитальной СК генерировались по равномерному закону в диапазоне [-1000;1000]. Затем вектора нормировались, т.к. важны направления этих векторов и угол между ними, а не их длина.

Вектора в связанной СК получены по формуле (1) с добавлением Гауссовского шума (среднее значение равно нулю, величина среднеквадратического отклонения (СКО) принималась равной 1% или 10% модуля вектора). Затем вектора нормировались.

Мера ошибки определения ориентации КА находится по формуле

$$\Phi = \arccos\left(\frac{1}{2}(tr(\mathbf{B}_{ou}) - 1)\right),$$

где $\mathbf{B}_{ou} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}_1^T$, \mathbf{M} – истинная матрица поворота, \mathbf{M}_1 – найденная матрица поворота.

Для каждого алгоритма подсчитаны: мера ошибки определения ориентации, скорость работы для выборки размера 10000. А количество операций с плавающей точкой определялось для одной реализации алгоритма.

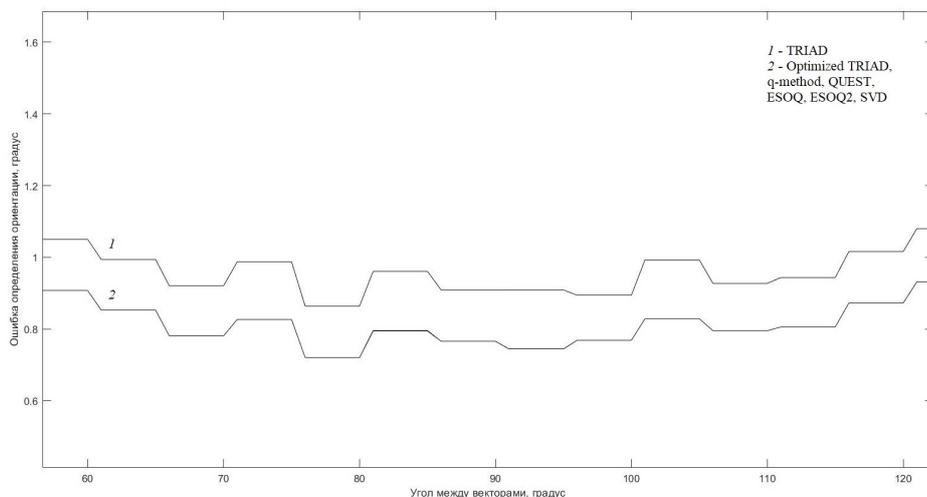


Рис. 1. Ошибка определения ориентации для СКО 1%

Т а б л и ц а 1

Результаты исследования

Алгоритм	Время работы*, с	Количество вычислений с плавающей точкой**	Тип выходной информации
TRIAD	0,053	11	Матрица поворота
Optimized TRIAD	0,169	42	Матрица поворота
q-method	0,241	59(900)***	Кватернион
QUEST	0,253	227	Кватернион
ESOQ	0,356	125	Кватернион
ESOQ2	0,152	79	Кватернион
SVD	0,175	53(650)***	Матрица поворота

* Указано время работы алгоритмов при обработке выборки объёма 10000 реализаций.

** Для вычислений операций с плавающей точкой использовалась функция, реализованная в Matlab [8].

*** В алгоритмах q-Method и SVD используются сложные встроенные функции, для которых нельзя определить количество вычислений с плавающей точкой, поэтому в скобках указаны значения, полученные в других исследованиях [7].

Заключение. По результатам моделирования видно, что наименее точным алгоритмом является TRIAD, остальные алгоритмы работают с примерно одинаковой точностью. Самыми быстрыми алгоритмами является TRIAD и ESOQ2, самые медленные – ESOQ и QUEST. Алгоритмы с наименьшим числом операций с плавающей точкой – TRIAD и ESOQ2. По результатам сравнения лучше всего себя показали алгоритмы TRIAD и ESOQ2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.
2. Black H.D. A Passive System for Determining the Attitude of a Satellite. AIAA Journal. 1964. Vol. 2. №7. P. 1350-1351.
3. Shuster M.D., Oh S.D. Three-Axis Attitude Determination from Vector Observations. Journal of Guidance and Control. 1981. Vol. 4. №1, Jan.-Feb. P. 70-77.
4. Markley F.L., Crassidis J.L. Static Attitude Determination Methods. Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control. 2014. Chap.5. P. 183-233.
5. Bar-Itzhack Y.I., Harman R.R. Optimized TRIAD algorithm for attitude determination. Collection of Technical papers (A96-34712 09-12). 1996. P. 422-427.
6. Davenport P. A vector approach to the algebra of rotations with applications. NASA TN D-4696. 1968.

7. Markley F.L., D. Mortari. How to estimate attitude from vector observations. AAS 99-427, presented at the AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Girdwood, Alaska. – 1999.
8. Qian, H. Counting the Floating Point Operations (FLOPS) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50608-counting-the-floating-point-operations-flops> (дата обращения 22.05.2024).

M. A. Ponomareva, A. V. Kramlikh (Samara National Research University, Samara, Russia). **Determination of the spacecraft orientation using instantaneous measurements**

Abstract. The paper presents a comparison of the most popular algorithms for determining the orientation of a spacecraft based on instantaneous measurements of various physical nature according to the following terms: the speed of algorithms, the accuracy and the type of output information.

М. А. ВЛАСОВА, А. Н. ШЕВЧЕНКО
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

С. В. ЕРМАК
(СПбПУ, Санкт-Петербург)

ОПТИМИЗАЦИЯ АМПЛИТУДЫ РАДИОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ ПРИ КОНТРОЛЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВЫХ ЯЧЕЕК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ КВАНТОВЫХ ДАТЧИКОВ

Исследована зависимость чувствительности магнитометрической схемы квантового магнитометра с оптической накачкой от амплитуды радиополя. Проведено численное моделирование зависимости крутизны резонанса от амплитуды радиополя для ячеек с парафиновым покрытием и ячеек с буферным газом. Произведена экспериментальная проверка моделирования на ячейке с высоким давлением буферного газа.

Введение. Квантовый датчик – это высокоточное измерительное устройство, принцип работы которого основан на использовании квантовых эффектов для детектирования и измерения различных физических величин: напряжённости магнитного поля, угловой скорости, времени, частоты. Ключевым элементом квантовых датчиков, работа которых основана на эффекте двойного радиооптического резонанса, является газовая ячейка [1-4], содержащая пары щелочных металлов, которые используются для создания спиновой поляризации атомов путем оптической накачки. Точность и чувствительность такого квантового датчика во многом определяется качеством изготовления и заполнения его газовой ячейки [3, 5]. Оценить это качество можно на основе анализа линии магнитного резонанса [6], по ширине которой можно определить скорость релаксации щелочного металла, напрямую влияющую на чувствительность всего датчика. При этом для ячеек с разными механизмами снижения скорости релаксации щелочного металла (с антирелаксационным покрытием [7] и с буферным газом [8]) характерные скорости релаксации разные и могут отличаться на 2-3 порядка, в то время как технологический разброс для ячеек одного типа обычно не превышает 10%. На практике ширина линии магнитного резонанса зависит не только от параметров измеряемой газовой ячейки, но и от условий проведения измерений [9-11], наиболее значимым из которых является амплитуда переменного магнитного поля радиочастотного диапазона, возбуждающая прецессию магнитных моментов. В опытных образцах квантовых магнитометров производится оптимизация амплитуды радиополя под параметры конкретной ячейки, однако в условиях серийного производства ячеек подбор оптимальной амплитуды радиополя для каждой ячейки является трудоемким процессом. Предлагаемый доклад посвящен оптимизации амплитуды радиополя при определении характеристик газовых ячеек различных типов и ячеек одного типа.

Оптимизация радиополя. Для наблюдения линии магнитного резонанса используется установка, представляющая собой M_x -магнитометр на проверяемой ячейке, заключённый в магнитный экран и систему катушек, обеспечивающих постоянное поле смещения [12]. M_x -сигнал, определяющий чувствительность всего квантового M_x -магнитометра (минимальную вариацию магнитного поля, которая в принципе может быть зарегистрирована) можно представить следующим образом [13]:

$$M_x = M_0 \frac{\Delta\omega \cdot \gamma \cdot B_1}{\Delta\omega^2 + \Gamma^2 + (\gamma \cdot B_1)^2} = M_0 \frac{\Delta\omega \cdot \gamma \cdot B_1}{\Delta\omega^2 + W^2}, \quad (1)$$

где M_0 – продольная намагниченность, вызываемая циркулярной компонентой света накачки вдоль магнитного поля; γ – гиромагнитное отношение щелочного металла; B_1 – амплитуда радиополя; $\Delta\omega = \omega_{rf} - \omega_0$ – расстройка частоты ω_{rf} относительно резонансной частоты ω_0 ; $\Gamma = \frac{1}{T}$ – время релаксации щелочного металла; $W = \sqrt{\Gamma^2 + (\gamma \cdot B_1)^2}$ – ширина линии магнитного резонанса.

M_x -сигнал в значительной степени определяется амплитудой радиочастотного поля, используемого для возбуждения резонансных переходов между энергетическими уровнями атомов. Увеличение амплитуды радиополя, с одной стороны, приводит к повышению амплитуды сигнала и, соответственно, чувствительности всего датчика а, с другой стороны, - к уширению

резонансной линии из-за чего она становится визуально не различима. Возникает необходимость подбора оптимальной амплитуды радиополя таким образом, чтобы обеспечить максимальную амплитуду сигнала при приемлемой ширине линии резонанса.

Осуществлять подбор оптимальной амплитуды принято по крутизне резонанса, которая теоретически рассчитывается как первая производная сигнала по расстройке частоты в точке, где эта расстройка равна нулю (т.е. когда частота радиочастотного поля совпадает с ларморовской частотой, или другими словами, в центре резонанса) [14]:

$$K = \left. \frac{dM_x(\omega)}{d\Delta\omega} \right|_{\Delta\omega=0} = M_0 \frac{\gamma \cdot B_1}{\Gamma^2 + \gamma \cdot B_1^2} = M_0 \frac{\gamma \cdot B_1}{W^2}. \quad (2)$$

Численное моделирование. В работе приведены результаты численного моделирования зависимости крутизны резонанса от частоты радиополя, генерируемого на катушках для двух типов ячеек: с антирелаксационным покрытием,

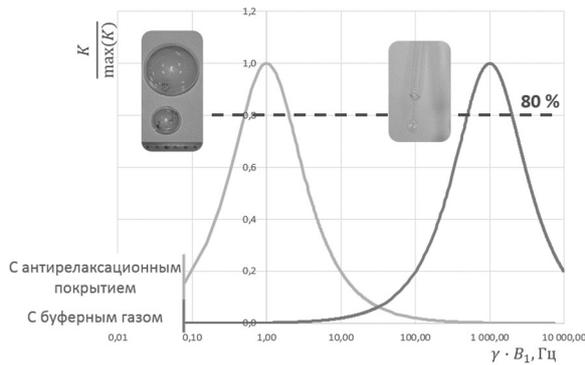


Рис. 1. Результаты моделирования крутизны резонанса для ячеек с парафиновым покрытием и ячеек с буферным газом

с характерной скоростью релаксации $\Gamma_{\text{хар.}} = 1$ Гц [7] и с буферным газом, $\Gamma_{\text{хар.}} = 1000$ Гц [8]. На рисунке 1 представлены графики зависимости крутизны резонанса, рассчитанной по формуле (3), нормированной на её же максимум, от $\gamma \cdot B_1$ для двух типов ячеек. Видно, что допустимые значения $\gamma \cdot B_1$ (крутизна составляет не менее 80% от максимально достижимой) находятся в пределах от 0,5 до 2 Гц для ячеек с антирелаксационным покрытием и от 500 до 2000 Гц для ячеек с буферным газом. При этом максимум крутизны для каждого типа ячеек достигается при $\gamma \cdot B_1 = \Gamma$.

Эксперимент. Для проведения экспериментальной проверки результатов моделирования была взята газовая ячейка с буферным газом. В ней с помощью катушек задавались разные значения амплитуд резонансного радиополя $\gamma \cdot B_1$, после чего для каждого из них были рассчитаны ширина W и амплитуда S , по которым был произведён экспериментальный расчет крутизны резонанса [14]:

$$K = \frac{S}{W}. \quad (3)$$

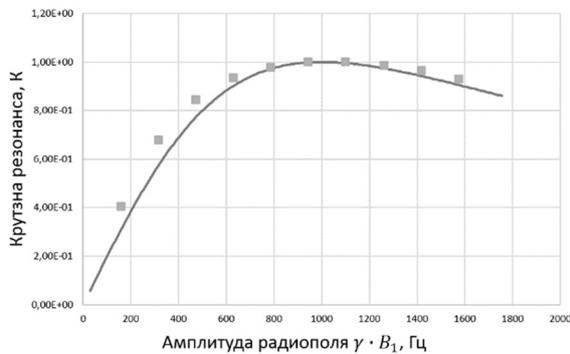


Рис. 2. Зависимость крутизны резонанса от амплитуды радиополя

На рисунке 2 представлена зависимость крутизны резонанса K от $\gamma \cdot B_1$. Видно, что для исследуемой ячейки с буферным газом крутизна резонанса имеет максимум при значении амплитуды радиополя, равном $\gamma \cdot B_1 \approx 1000$ Гц, что близко по значению характерной скорости релаксации $\Gamma_{\text{хар.}}$. При этом диапазон амплитуд радиополя, при которых снижение крутизны резонанса происходит не более, чем на 20% составляет от 500 до 1800 Гц.

Таким образом, установив на катушках амплитуду радиополя B_1 такую что $\gamma \cdot B_1 \approx 1000$ Гц, можно проводить проверку ячеек с буферным газом, имеющих характерное время релаксации $\Gamma_{\text{хар.}}$ от 500 до 1800 Гц. Этот диапазон шире технологического разброса характерных времён релаксации ячеек в пределах одного типа, который составляет не более 10%. Это позволяет проводить измерения ячеек с одинаковым механизмом снижения скорости релаксации, не изменяя параметров установки.

Заключение. В работе исследована зависимость чувствительности магнитометрической схемы M_x -магнитометра от амплитуды радиополя. С помощью численного моделирования выявлено, что для разных типов ячеек существует своя оптимальная амплитуда, обеспечивающая максимум крутизны резонанса. Показано, что экспериментально найденная для ячейки с буферным газом зона амплитуд радиочастотного поля, при которых достигается максимум крутизны линии резонанса, совпадает со значением, полученным при численном моделировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Walker T. G., Larsen M. S.** Spin-exchange-pumped NMR gyros. *Advances in atomic, molecular, and optical physics*. 2016. Vol. 65. P. 377
2. **Пешехонов В. Г., Вершовский А. К. и др.** Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация. – 2018. – Т. 26. – №. 1. – С. 55-80.
3. **Knapiewicz P.** Technological assessment of MEMS alkali vapor cells for atomic references. *Micromachines*. 2018. Т. 10. №. 1. С. 25.
4. **Vlasova M. A., Shevchenko A. N.** Development of alkali vapor cell for miniature nuclear magnetic gyroscope *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2022. Т. 1215. – №. 1. – С. 012013.
5. **Vershovskii, A. K., Litmanovich, Yu. A., Pazgalev, A. S., Peshekhonov, V. G.** Nuclear magnetic resonance gyroscope: the ultimate parameters. *Gyroscopy and Navigation*. 2018. 9(3). P. 162.
6. **Alexandrov E.B., Balabas M.V., Pazgalev A.S., Vershovskii A.K., Yakobson N.N.** Laser Physics. 1996. Vol. 6. N 2. P. 244-251
7. **Alexandrov E.B., Balabas M.V., Pasgalev A.S., Vershovskii A.K., Yakobson N.N.** Light-induced desorption of alkali-metal atoms from paraffin coating. *Physical Review A*. 2002. Vol. 66, № 4. P. 042903
8. **Budker D., Romalis M.** Optical magnetometry *Nature Physics*. 2007. Vol. 3, № 4. P. 227-234.
9. **S. Appelt, A. Ben-Amar Baranga, A. R. Young, and W. Happer** Light narrowing of rubidium magnetic-resonance lines in high-pressure optical-pumping cells. *PHYSICAL REVIEW A*. 1999. V.59. N.3
10. **Bison G., Wynands R., Weis A.** Optimization and performance of an optical cardiomagnetometer. *JOSA B*. 2005. Т. 22. №. 1. С. 77-87.
11. **Власова М.А., Шевченко А.Н., Дементьев М.М.** Разработка систем термостабилизации для установки по контролю параметров газовых ячеек квантовых датчиков. *Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО*. 2022. Т. 2. С. 15-18.
12. **Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В.** Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука, 1972.
13. **Bloch F.** Physics Review. 1946. Vol. 70. N 7. P. 460-474
14. **Вершовский А. К., Пазгалева А. С.** Оптимизация фактора качества магнитного M_x -резонанса. *Журнал технической физики*. 2008. Т. 78. №. 5. С.2078-2084.

М.А.Власова, А.Н.Шевченко (CSRI Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg), S.V.Ermak (SPbPU Polytech, Saint-Petersburg).
Requirements to formatting the papers of the Conference of Young Scientists “Navigation and Motion Control”

Abstract. The dependence of the sensitivity of a quantum optically pumped magnetometer scheme on the radio-frequency field amplitude has been investigated. Numerical modeling of the resonance slope was performed for cells with paraffin coating and cells with buffer gas. Experimental verification of the modeling was carried out on a cell with high buffer gas pressure.

В.Г. КАРАУЛОВ,
(Университет ИТМО, АО Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург)

А.М. ГРУЗЛИКОВ, М.Д. КОРАБЛЕВА
(АО Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург)

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Рассматривается задача относительной навигации подводного аппарата (ПА) в интересах приведения к донной станции (ДС). В рамках детерминированного подхода приводится постановка соответствующей задачи оценивания относительных координат и углов ориентации ПА. Решение поставленной задачи осуществляется с применением метода наименьших квадратов. Для уменьшения априорной неопределенности знания координат и углов ориентации предлагается использовать архитектуру глубоких нейронных сетей. На основании проведенного имитационного моделирования сравниваются среднеквадратические погрешности (СКП) оценивания относительных координат и углов ориентации ПА при различных методах обучения полносвязных нейронных сетей.

Введение. Работа посвящена задаче определения координат и углов ориентации подводного аппарата (ПА) в интересах решения задачи приведения аппарата к донной станции (ДС).

Гидроакустическая система ПА (рис.1) имеет в своем составе приёмные антенны, которые размещаются под килем аппарата в кормовой и носовой частях, а также излучатели, устанавливаемые по краям базы и осуществляющие ненаправленное излучение сигнала. Следует отметить, что 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.

Предлагаемый доклад является продолжением работ авторов [3-5]. Целью работы является устранение недостатка, связанного с большими затратами ресурсов памяти на вычислительной машине. Это вызвано тем, что требуется хранить большое количество данных в виде kd-дерева используемого в методе K-ближайших соседей. Настоящая работа призвана устранить этот недостаток путем использования глубокой нейронной сети.

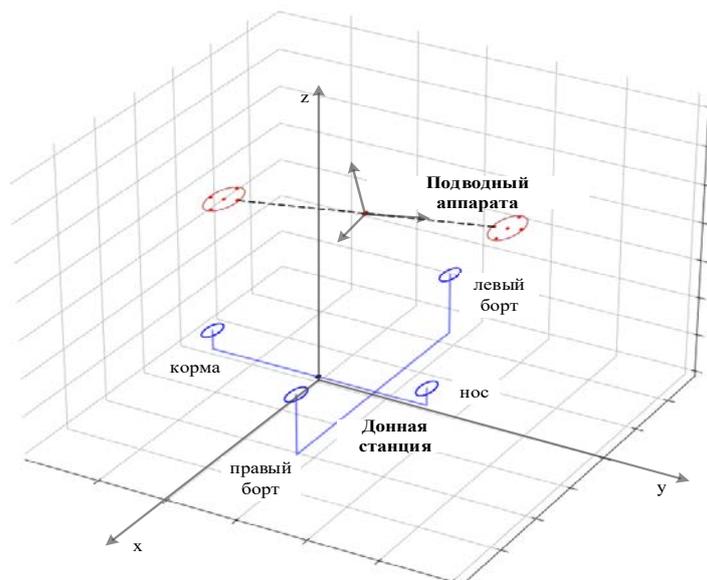


Рис. 1. Схема размещения гидроакустической системы ПА и ДС

Постановка детерминированной задачи оценивания. На борту ПА имеется группа из n гидрофонов, работающих в единой шкале времени и расположенных в носовой и кормовой частях, также на ДС размещается m гидроакустических маяков, размещенных по краям ДС (рис.

1). Маяки излучают тональный сигнал в соответствии с известной циклограммой излучения, стоит отметить, что шкала времени на ПА и ДС не совпадает.

Будем следовать работе [2] и запишем измерения псевдодальностей между маяками и гидрофонами, которые формируются на ПА:

$$y_j^i = \hat{c}_0 T_j^i = d_j^i + \delta + v_j^i + \Delta c T_j^i, \quad j = \overline{1, n}, i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где i – номер маяка, j – номер гидрофона, d_j^i – истинные значения дальностей, v_j^i – помехи, δ – погрешность измерения псевдодальности из-за расхождения шкал времени (псевдослучайная величина), T_j^i – измеренные времена прихода сигналов от маяков на гидрофонах, \hat{c}_0 – априорная оценка скорости звука в воде, Δc – ошибка знания скорости распространения звука в воде. Помехи v_j^i являются взаимно некоррелированными центрированными нормально распределенными случайными величинами со среднеквадратическими отклонениями (СКО) σ_j^i . Известны координаты $x^i, y^i, z^i, i = \overline{1, m}$ маяков в осях x, y, z связанной с ДС прямоугольной системе координат (СК), а также координаты $\tilde{x}_j, \tilde{y}_j, \tilde{z}_j, j = \overline{1, n}$ гидрофонов в осях $\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$ связанной с ПА прямоугольной СК. Ориентацию ПА относительно СК, связанной с ДС, будем определять с помощью углов курса K , дифферента ψ и крена θ . Центром СК, связанной с ПА, является его контрольная точка (КТ), т.е. координаты КТ в этой СК $\tilde{x}_0 = \tilde{y}_0 = \tilde{z}_0 = 0$, а в связанной с ДС СК – x_0, y_0, z_0 . Априорная информация об $x_0, y_0, z_0, K, \psi, \theta, \delta$ отсутствует.

Введем обозначения: $s^i = (x^i, y^i, z^i), i = \overline{1, m}$ – для векторов координат маяков в связанной с ДС СК; $\tilde{p}_j = (\tilde{x}_j, \tilde{y}_j, \tilde{z}_j), j = \overline{1, n}$ – для векторов координат гидрофонов в СК, связанной с ПА; $p_j = (x_j, y_j, z_j), j = \overline{0, n}$ – для векторов координат КТ и гидрофонов в связанной с ДС СК; $A(K, \psi, \theta)$ – для матрицы перехода [1] от осей $\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$ к осям x, y, z . Отметим, что $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$.

Следуя работе [2], для измеряемых дальностей можно записать выражения:

$$d_j^i = |p_j - s^i| = |p_0 + A(K, \psi, \theta) \tilde{p}_j - s^i|. \quad (2)$$

С помощью измерений (1) и с учетом (2) требуется оценить вектор p_0 координат КТ ПА в связанной с ДС СК и углы K, ψ, θ ориентации ПА относительно этой СК, а также погрешность измерений псевдодальностей δ и ошибку знания скорости распространения звука в воде Δc .

Полносвязная нейронная сеть. Предлагается использовать полносвязную архитектуру глубокой нейронной сети для уменьшения области априорной неопределенности знания относительных координат и углов ориентации для первого приближения при решении задачи оценивания. Сеть прямого распространения будет обучаться на наборе данных, который формируется исходя из геометрической модели - заданные координаты маяков подводной базовой станции и координат приёмных элементов ПА на заданной координатной сетке и таблице углов ориентации. Обучающая выборка строится по следующему правилу:

Пусть обучающая выборка строится по следующему правилу:

- $(t_a^j - t_b^j)_{j \in \overline{1, 4}}$ – разница времён приёма сигнала, между парами максимально разнесенных приёмных элементов (a, b) при фиксированном маяке;
- $(t_i^a - t_i^b - T^{a,b})_{i \in \overline{1, 10}}$ – разница времён приёма сигнала между парами маяков (a, b) на фиксированном приёмном элементе и смещением по времени излучения сигнала маяками (при фиксированном значении $T^{a,b}$).

Таким образом, входной слой будет состоять из 100 нейронов, выходной из 6. После каждого скрытого слоя применяется функция активации ReLU (Rectified Linear Unit), а после последнего функция активации отсутствует.

Имитационное моделирование и полученные результаты. Проведено имитационного моделирования движения ПА вниз к ДС из точки (0, 0, 50) м. с вращением вокруг вертикальной оси ПА по часовой стрелке и с нулевыми углами крена и дифферента. По результатам моделирования были получены оценки среднеквадратических погрешностей (СКП) координат и курсового угла аппарата при использовании полносвязных архитектур нейронных сетей с использованием различных методов их обучения (см. таблица 1).

Таблица 1

Сравнение СКП оценки координат и курсового угла для 5 моделей с различными методами обучения

		СКП X, м	СКП Y, м	СКП Z, м	СКП K, °
Модель 1 (5x100)	Без BN, L2 = 0	1.21	1.36	4.61	4.7
	C BN, L2 = 0	1.39	1.67	5.45	4.78
	C BN, L2 = 0.001	0.85	1.48	6.84	5.2
	C BN, L2 = 0.01	0.8	1.27	6.2	5.09
	C BN, L2 = 0.1	1.07	1.02	20.5	5.45
Модель 2 (10x100)	Без BN, L2 = 0	1.61	2.09	4.78	4.55
	C BN, L2 = 0	1.97	1.14	5.18	5.05
	C BN, L2 = 0.001	1.88	0.91	4.94	4.39
	C BN, L2 = 0.01	1.82	1.8	5.78	5.07
	C BN, L2 = 0.1	0.7	0.61	14.43	5.85
Модель 3 (15x100)	Без BN, L2 = 0	1.4	1.84	3.65	4.67
	C BN, L2 = 0	1.59	1.34	5.98	4.99
	C BN, L2 = 0.001	3.34	1.64	4.52	4.89
	C BN, L2 = 0.01	3.99	3.54	5.69	4.85
	C BN, L2 = 0.1	-	-	-	-
Модель 4 (100-500-250-50)	Без BN, L2 = 0	1.75	0.99	4.54	3.89
	C BN, L2 = 0	1.68	2.21	5.21	4.55
	C BN, L2 = 0.001	1.35	2.3	6.41	4.57
	C BN, L2 = 0.01	2.76	2.5	7.93	5.27
	C BN, L2 = 0.1	0.52	0.7	18.85	5.62
Модель 5 (500-1000-3000-6000-4000-1000-500-250-100)	Без BN, L2 = 0	1.66	1.73	4.36	4.9
	C BN, L2 = 0	1.35	1.03	4.98	4.62
	C BN, L2 = 0.001	0.46	2.56	5.9	4.59
	C BN, L2 = 0.01	1.07	0.82	5.09	5.5
	C BN, L2 = 0.1	-	-	-	-

Были проанализированы следующие конфигурации полносвязных нейронных сетей: с применением batch normalization (BN), с применением L2 регуляризацией (в таблице приведены значения параметра регуляризации), а также 5 структур сетей, где первые три модели имеют все скрытые слои по 100 нейронов, а 4 и 5 модель имеют структуру, приведенную в скобках (количество нейронов в каждом скрытом слое записаны через дефис).

По результатам видно, что применение регуляризации только ухудшает точность предсказания, в то время как 4 и 5 модель с параметром регуляризации 0.1, вообще не смогли обучиться. Применение BN также не позволило улучшить модель. В результате лучшую точность показала

4 модель, без применения L2 регуляризации и VN. Оценки по углам крена и дифферента не приведены, так как каждая модель оценивала их с СКП не выше 0.01 градуса.

Заключение. В работе приведена постановка задачи оценки относительных координат и определения углов ориентации ПА по сигналам от гидроакустических маяков в рамках детерминированного подхода. Показана возможность применения глубокой нейронной сети при ее решении на первом этапе сужения области априорной неопределенности знания относительных координат и углов ориентации.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Емельянец Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2016.
2. **Кошаев Д.А.** Относительное позиционирование и определение ориентации автономного необитаемого подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // Гироскопия и навигация. Том 30. №4 (119). 2022. С. 122–141
3. **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.
4. **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.
5. **Karaulov, V.G., Gruzlikov, A.M., Zolotarevich V.P.** Recursive Algorithm for AUV Positing and Determining its Orientation, 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). 2023. P. 1-4.

V.G. Karaulov (ITMO University, Concern CSRI Elektropribor JSC, Saint Petersburg, Russia), A.M. Gruzlikov (Concern CSRI Elektropribor, Saint Petersburg, Russia), M. D. Korableva (Concern CSRI Elektropribor JSC, Saint Petersburg, Russia).
Solving the problem of relative navigation using deep neural networks

Abstract. The problem of relative navigation of an underwater vehicle (UV) in the interests of bringing it to a docking station (DS) is considered. In the framework of deterministic approach, the problem of estimation of relative coordinates and orientation angles of the UV is posed. The problem is solved using the least-squares method. To reduce the a priori uncertainty of knowledge of coordinates and orientation angles, it is proposed to use the deep neural network architecture. As a result of simulation modeling, a comparison of the standard deviations of the root mean square (RMS) of the estimates of the coordinates and angles of orientation of UVs at different methods of training of the fully-connected neural network is given.

М. А. СОРВИНА

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург)

БЕСПРОВОДНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Описан принцип работы и рассмотрены тренды в развитии акселерометров на поверхностных акустических волнах. Предложены 4 метода реализации беспроводной передачи данных от чувствительного элемента. Описаны их преимущества и недостатки. Представлена упрощенная мультифизическая модель, позволяющая смоделировать предложенные методы.

Введение. Акселерометры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) привлекают значительное внимание научных групп благодаря своей надежности, ударопрочности, высокой чувствительности и низкому потреблению энергии [1-2]. Эти акселерометры используют распространение акустических волн по поверхности пьезоэлектрического материала для оценки значений ускорения объекта, на котором они установлены. С развитием беспроводных технологий [3] интеграция ПАВ-акселерометров с системами беспроводной передачи данных становится все более осуществимой, что делает их идеальными для различных приложений, например, для промышленного мониторинга [4].

Предлагаемый доклад посвящен рассмотрению способов организации чувствительного элемента акселерометра на ПАВ для последующей передачи данных.

Беспроводной акселерометр на поверхностных акустических волнах. В содержание доклада входит описание принципа работы акселерометра на ПАВ, варианты схем пассивного подключения, моделирование в Comsol Multiphysics чувствительного элемента с двусторонней передачей сигнала.

Конфигурация чувствительного элемента акселерометра на ПАВ. Чувствительный элемент акселерометра на ПАВ включает пьезоэлектрическую подложку 1, оснащенную встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) 2 и 3 на ее поверхности (Рис. 1а). Входной ВШП 3 преобразует электрический сигнал в акустическую волну, которая распространяется по подложке к выходному ВШП 2, совершающему обратное преобразование [5]. Процесс измерения ускорения состоит из следующих шагов: во-первых, под влиянием ускорения происходит деформация материала; во-вторых, из-за возникающих внутренних механических напряжений меняется плотность; в-третьих, изменение плотности материала влияет на скорость распространения волны, а, следовательно, изменяется время распространения волны по подложке. Именно по временной задержке можно судить об изменении ускорения объекта. Типичные конфигурации конструкции этих датчиков включают линии задержки и резонаторы, которые структурированы для максимизации чувствительности и точности измерений.

Реализация беспроводной передачи данных. Базовая установка включает передатчик, подключенный к акселерометру на ПАВ, преобразующий электрический сигнал в радиочастотный. Приемник принимает этот сигнал и обрабатывает его для интерпретации данных [6]. Реализовать передачу данных с чувствительного элемента можно несколькими способами.

Первый способ представлен на Рисунке 1а, когда сигнал подается на антенну 4, с которой он поступает на возбуждающий ВШП 3, генерирующий ПАВ, распространяющуюся на приемный ВШП, на котором совершается обратное преобразование в электрический сигнал и передача данных по антенне 5. Описанный способ наиболее приближен к методу проводного съема. Однако его недостаток – возможная интерференция между антеннами.

Второй способ (Рис. 1б) подразумевает использование одной антенны как для приема, так и для передачи сигнала и размещение двух блоков отражателей, разницу в расстоянии между их путями можно найти, вычтя одно из другого: $r_2 - r_1$. Таким образом, получится избежать интерференции между антеннами. Но при этом недостатком будет потенциальное чрезмерное ослаб-

¹ Научный руководитель: к.т.н., зав. кафедрой Кукаев А.С.

ление амплитуды ПАВ, которой придется дважды пройти через первый отражатель. Последующие два способа позволяют избежать этого.

В третьем способе (Рис. 1в) предлагается разнести отражатели по разные стороны от возбуждающего ВШП. Недостатком может быть последующее прохождение на обратном пути фронта волны через ВШП насквозь и наложение волн друг на друга, что будет вызывать эхо и мешать идентификации полезного сигнала.

В четвертом способе предлагается использование 2 линий задержки (Рис 1.г). Однако минусом может стать взаимодействие фронтов одновременно распространяющихся по поверхности волн, а также возникновение электромеханической связи между двумя ВШП.

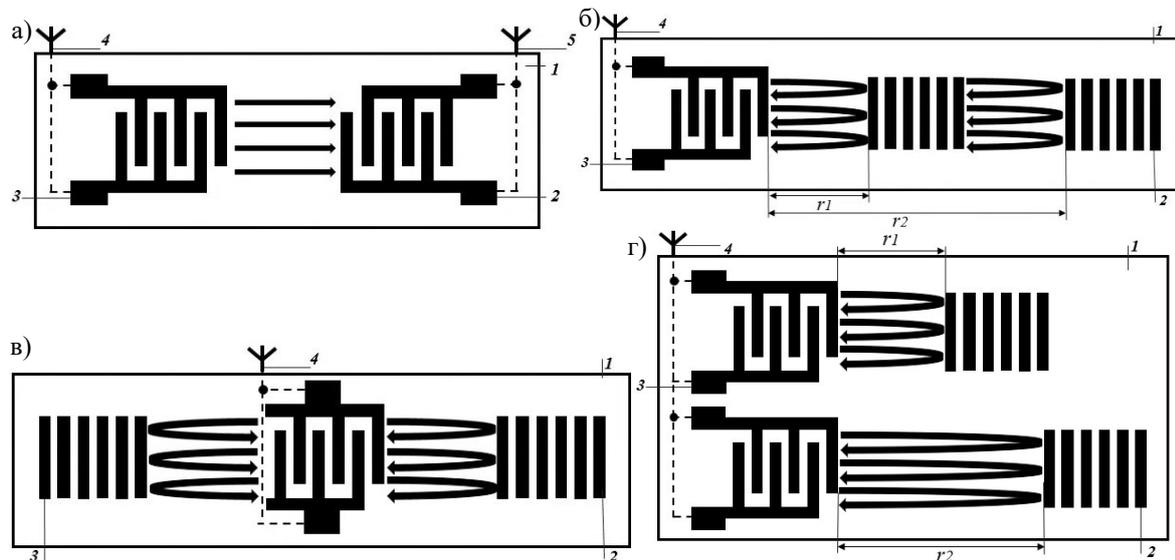


Рис. 1. Топологии чувствительного элемента для передачи данных

Моделирование в COMSOL для двусторонней передачи сигналов. Для того, чтобы исследовать описанные выше способы, была построена упрощенная модель в среде Comsol Multiphysics (Рис. 2а). Габариты модели составили $3,75\lambda \times 0,25\lambda \times 3\lambda$, где λ – длина волны, составляет 0,796 мм. В модели заданы два электрода высотой $0,01\lambda$, один из них заземлен, а на другой задано условие Terminated с типом Circuit. На этот электрод подается синусоидальный сигнал амплитудой 1 В и периодом 0,2 мкс.

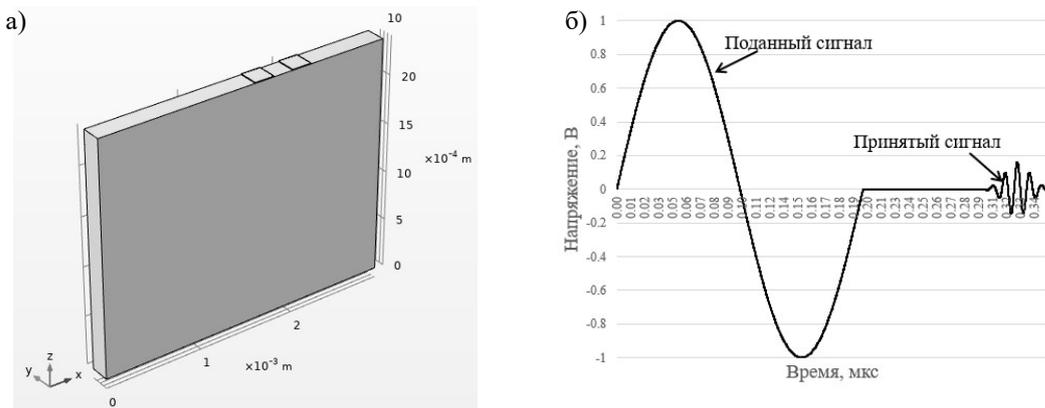


Рис. 2. Упрощенная модель чувствительного элемента и график изменения напряжения на ВШП

График изменения напряжения представлен на Рисунке 2б. Как можно видеть, амплитуда сигнала уменьшилась в 5 раз, в связи с потерями. Данный метод задания условий подачи и съема сигнала с одного ВШП является перспективным для дальнейших исследований.

Заключение. В ходе доклада были рассмотрены принципы беспроводной передачи данных для акселерометра на ПАВ. Предложены 4 метода подачи и съёма сигнала. Разработана мультифизическая модель для расчёта параметров и получены графики напряжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта РНФ 23-79-10259 в форме субсидий в сфере научной и научно-технической деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yihan Zhao et al.** Equal-strength beam design of acoustic wave accelerometers. 2023 Phys. Scr. 98
2. **Juan Zhang, Wen Hua Cheng, Hao Wang, Lei Zhang, Xiang Rong Li, Hong Shuai Ma, Jun Qi Pang & QiuLin Tan.** Langasite-based SAW high-temperature vibration sensor with temperature decoupling. Science China Technological Sciences. Volume 67, pages 1946–1956, 2024
3. **L. Reindl, I. Shrena, S. Kenshil and R. Peter.** Wireless measurement of temperature using surface acoustic waves sensors, IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. Proceedings of the 2003, Tampa, FL, USA, 2003, pp. 935-941
4. **Debdyuti Mandal, Sourav Banerjee.** Surface Acoustic Wave (SAW) Sensors: Physics, Materials, and Applications. Sensors 2022, 22(3), 820
5. **Shevchenko S. et al.** Surface-Acoustic-Wave Sensor Design for Acceleration Measurement. Sensors 2018. 18(7), 2301
6. **Fabian Lurz et al.** Reader Architectures for Wireless Surface Acoustic Wave Sensors. Sensors 2018, 18(6), 1734

M.A. Sorvina (St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg). **Wireless implementation of surface acoustic wave accelerometers**

Abstract. The operating principle and development trends of surface acoustic wave accelerometers are described. Four methods of implementing wireless data transmission from a sensitive element are proposed. Their advantages and disadvantages are described. A simplified multiphysical model is presented, allowing the proposed methods to be simulated.

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

РЕКУРРЕНТНЫЙ ИТЕРАЦИОННЫЙ СГЛАЖИВАЮЩИЙ ПАЧЕЧНЫЙ ЛИНЕАРИЗОВАННЫЙ ФИЛЬТР В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Для общего случая решения задачи нелинейной фильтрации при наличии нелинейностей как в уравнениях для формирующего фильтра, так и в уравнениях измерений, описан рекуррентный итерационный сглаживающий пачечный линейризованный алгоритм. Эффективность его применения проанализирована на примере решения практических задач обработки навигационной информации.

Алгоритмы, разрабатываемые для решения нелинейных задач обработки навигационной информации, в большинстве случаев строятся в рамках байесовского стохастического подхода [1-9]. Это обусловлено необходимостью выработки не только оценки вектора неизвестных параметров, но также и соответствующей ему расчётной характеристики точности. По сути целью решения задачи фильтрации в таком случае является нахождение некоего набора параметров, описывающих вид апостериорной функции плотности распределения вероятности (ф.п.р.в.). В качестве оценки на выходе алгоритма как правило используется рассчитанное с использованием этого набора математическое ожидание, а в качестве характеристики точности – среднеквадратическая погрешность (СКП) оценивания. В случае, когда значения расчётных и действительных СКО согласованы, принято говорить о состоятельности алгоритма [10-12].

Одно из основных требований, предъявляемых к алгоритмам, предназначенным для решения задач в режиме реального времени, – низкая вычислительная сложность, что позволяет не предъявлять значительных требований при их реализации в бортовом вычислителе. В связи с этим зачастую алгоритмы фильтрации строят с использованием рекуррентной схемы, подразумевающей обработку измерений последовательно – одно за другим, причем после обработки на текущем шаге далее измерение более не используется. При её реализации от шага к шагу необходимо сохранять набор параметров, описывающих вид апостериорной ф.п.р.в.

Наибольшее распространение при решении практических задач получили рекуррентные алгоритмы калмановского типа (АКТ), апостериорная ф.п.р.в. в которых на каждом шаге заменяется её гауссовской аппроксимацией. Такая замена позволяет легко реализовать простой в вычислительном отношении рекуррентный алгоритм, поскольку от шага к шагу достаточно сохранять лишь два параметра – математическое ожидание и матрицу ковариаций ошибок оценивания, полностью описывающих гауссовскую аппроксимацию ф.п.р. в. В ряде случаев, когда вид апостериорной ф.п.р.в. близок к гауссовскому, АКТ оказываются состоятельными и позволяют получить оценку по точности, близкую к оптимальной в среднеквадратическом смысле [3-8]. Однако, когда вид апостериорной ф.п.р.в. существенно отличается от нормального, значительными будут и погрешности, вызванные её аппроксимацией. В силу рекуррентного характера алгоритма, эти погрешности будут накапливаться, что в итоге может привести к его неработоспособности.

Для решения таких задач при построении алгоритма фильтрации можно, например, для описания вида апостериорной ф.п.р.в. использовать значительный набор параметров, передающий от шага к шагу её сложный вид, а рекуррентный характер алгоритма организовать с использованием известного рекуррентного соотношения [6, 13-18]. В качестве набора параметров, в частности, может выступать взвешенный набор дельта-функций. Однако построенные таким образом алгоритмы в большинстве своём оказываются сложными в вычислительном плане и труднореализуемыми в бортовых вычислителях, что делает их непригодными для решения задач в режиме реального времени.

Существует ряд задач, в которых апостериорная плотность, являясь в начальные моменты времени многоэкстремальной, в процессе своей эволюции принимает одноэкстремальный вид, близкий к гауссовскому. Очевидно, что рекуррентные АКТ при их решении окажутся неработоспособными. Однако, как было показано в работах [6,19-23], достигать точности оптимального оценивания и быть состоятельными, начиная с момента, когда апостериорная ф.п.р.в. становится близка к гауссовской, могут не рекуррентные АКТ. На вход таких алгоритмов поступает пач-

ка всех, накопленных к текущему моменту времени измерений, в связи с чем их принято называть пачечными [21-23]. При всех своих достоинствах, их вычислительная нагрузка остаётся достаточно высокой. В первую очередь это обусловлено необходимостью обращения матриц высокой размерности.

Для преодоления этого недостатка в [23] предложен алгоритм, названный рекуррентным итерационным сглаживающим пачечным линеаризованным фильтром (РИС-ПЛФ), являющимся по своей сути нерекуррентным алгоритмом, но при этом обладающий достоинством алгоритмов, построенных с использованием рекуррентной схемы, а именно низкой вычислительной нагрузкой. Это достигается за счет того, что вместо обращения матрицы высокой размерности на каждой итерации, используется рекуррентная процедура, обеспечивающая нахождения необходимых оценок путем решения задачи сглаживания. В работе [23] приведено лишь краткое описание такого алгоритма, без его формульных зависимостей и не вникая в особенности его реализации.

Целью доклада является подробное описание РИС-ПЛФ для общего случая задачи, постановка которой сформулирована в рамках байесовского стохастического подхода, а нелинейности содержатся как в уравнениях динамики, так и в уравнениях измерений, а также демонстрации его достоинств при решении практических задач обработки навигационной информации.

*Работа подготовлена при поддержке гранта РФФ 23-19-00626,
<https://rscf.ru/project/23-19-00626/>.*

ЛИТЕРАТУРА

1. **R.E. Kalman**, A new approach to linear filtering and prediction problems, Trans. ASME. Series D, J. Basic Engineering, 82, 1960, pp. 35-45.
2. **Стратонович Р.Л.** Условные процессы Маркова // Теория вероятн. и ее примен. 1960. Т. 5. N 2. С. 172-195.
3. **Jazwinski A. H.** Stochastic process and filtering theory. New York: Academic Press, 1970.
4. **Gelb, A.** Applied Optimal Estimation. M.I.T. Press, Cambridge, 1974.
5. **Дмитриев С.П.** Высокоточная морская навигация. Судостроение, Санкт-Петербург, 1991, 223.
6. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 1998-370 с.
7. **Simon D.** Optimal State Estimation: Kalman ∞ and Nonlinear Approaches // New Jersey, NJ: John Wiley & Sons, Inc. – 2006.
8. **Särkkä S.,** Bayesian Filtering and Smoothing. Cambridge University Press, 2013.
9. **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", 2017-509с
10. **Bar-Shalom Y., Li X., Kirubarajan T.** Estimation with applications to tracking and navigation, New York, Wiley-Interscience, 2001, 581p.
11. **Болотин Ю.В., Брагин А.В., Гулевский Д.В.** Исследование состоятельности расширенного фильтра Калмана в задаче навигации пешехода с БИНС, закрепленными на стопах. Гирокоспия и навигация. 2021. Т. 29. № 2 (113). С. 59-77.
12. **О.А. Степанов, А.М. Исаев.** Методика сравнительного анализа рекуррентных алгоритмов нелинейных фильтрации в задачах обработки навигационной информации на основе предсказательного моделирования. // Гирокоспия и навигация. Том 31. №3 (122), 2023. С. 48-65. EDN: MVWKGK
13. **Busy R.S.** Nonlinear filtering theory//IEEE Trans on Automatic Control.-1965
14. **Doucet A., Freitas N. De., and Gordon N.** Sequential Monte Carlo Methods in Practice // New York, NY, USA: Springer-Verlag – 2001.
15. **Chen Z.** Bayesian Filtering: From Kalman Filters to Particle Filters, and Beyond. Adaptive Systems Laboratory Technical Report, McMaster University. 2003 Hamilton
16. **Sarkka S.,** Vehtari A., Lampinen J. Rao-Blackwellized particle filter for multiple target tracking. Information Fusion. 2007. vol. 8 (1), pp. 2-15
17. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Применение последовательных методов Монте-Карло с использованием процедур аналитического интегрирования при обработке навигационной информации. XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 3324-3337.
18. **Dunik J., Straka O., Matousek J., and Brandner M.** Accurate Density-Weighted Convolution for Point-Mass Filter and Predictor. Accepted for IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021
19. **Васильев В.А., Литвиненко Ю.А., Степанов О.А., Торопов А.Б.** Сравнение рекуррентных и нерекуррентных алгоритмов фильтрации при решении задачи навигации по геофизическим полям // В сборнике: XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ-2021. материалы XIV мультиконференции: в 4 т. Ростов-на-Дону, 2021. С. 125-127.

20. **О.А. Степанов, А.М. Исаев, Ю.А. Литвиненко** Сравнение рекуррентных и нерекуррентных схем построения алгоритмов, основанных на линеаризации, при решении одного класса задач нелинейного оценивания // Труды XIV Всероссийского совещания по проблемам управления. М.: Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, 2024. – в печати
21. **Степанов О.А., Литвиненко Ю.А., Исаев А.М.** Итерационный сглаживающий пачечный линеаризованный фильтр в задаче навигации группы АНПА. Материалы XXXI Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» с. 117, 2024.
22. **Stepanov O.A., Litvinenko Y.A., Isaev A.M.** Comparison of recursive and nonrecursive linearization-based algorithms for one class of nonlinear estimation problems. 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2024 - в печати
23. **О.А. Степанов, В.П. Золотаревич, Ю.А. Литвиненко, А.М. Исаев, А.В. Моторин,** Алгоритмы оптимизации на графах в задачах обработки навигационной информации. Отличия и взаимосвязь с байесовскими алгоритмами оценивания // Материалы XXXI Санкт-Петербургской международной конференция по интегрированным навигационным системам. 2024.
24. **О.А. Степанов, Ю.А. Литвиненко, А.М. Исаев** Сравнительный анализ квазилинейных алгоритмов калмановского типа в задаче оценивания марковской последовательности при нелинейностях в формирующем фильтре и уравнениях измерений. Мехатроника, автоматизация, управление. 2024;26(12):503-512.

O. A. Stepanov, Yu. A. Litvinenko, A. M., Isaev (ITMO University, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg).
Recursive iterative batch linearized smoother for navigation estimation problems

Abstract. A recursive iterative batch linearization-based smoother is proposed for the general case of solving nonlinear problems in the presence of/with nonlinearities both in the equations for the shaping filter and measurement equations. The efficiency of its application is analyzed by the example of solving practical problems of navigation information processing.

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

СРАВНЕНИЕ БАЙЕСОВСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ И МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ НА ГРАФАХ

Обсуждаются возможности и особенности построения алгоритмов оценивания на основе фактор-граф оптимизации в задачах обработки навигационной информации. Рассматриваются взаимосвязь и различия между байесовским подходом и алгоритмами на основе фактор-граф оптимизации. Отмечается, что основная особенность алгоритмов на основе фактор-граф оптимизации заключается в их нерекуррентном характере, порожденным фактом обработки пачки измерений, использование которой также практикуется и при синтезе алгоритмов в рамках байесовского подхода. Отличия между алгоритмами, построенными с использованием двух подходов, обусловлены разными вариантами факторизации апостериорной функции плотности распределения вероятностей. Приводятся примеры построения рекуррентных и нерекуррентных алгоритмов оценивания, с позиций фактор-граф оптимизации и байесовского подхода, в том числе для задачи одновременной локализации и картографирования.

Введение. При решении задач обработки навигационной информации широкое применение получили алгоритмы, основанные на байесовской теории оценивания. В области построения таких алгоритмов достигнуты значительные успехи, особенно применительно к линейным задачам оценивания, для решения которых применяются рекуррентные алгоритмы калмановского типа, носящие, по сути, универсальный характер. Что касается задач нелинейного оценивания, то, в силу отсутствия такого универсального алгоритма, актуальность разработки эффективных алгоритмов оценивания, в том числе и применительно к навигационным приложениям, сохраняется. Также остается актуальной задача синтеза алгоритмов федеративной фильтрации. В этой связи в последнее время значительное внимание уделяется алгоритмам, основанным на использовании методов фактор-граф оптимизации (ФГО) (Factor-graph optimization, FGO) [1–15]. Алгоритмы ФГО достаточно активно внедряются в сферу обработки навигационной информации, особенно в робототехнических системах [1,3,5,7–15], в частности для решения задач одновременной локализации и картографирования (Simultaneous Localization and Mapping – SLAM) [2,4,5,10–12], в том числе и при использовании информации о геофизических полях. Среди достоинств алгоритмов на основе методов ФГО обычно отмечают их более высокую точность [1,3,7,9] по сравнению с обобщенным фильтром Калмана (ОФК) и низкую вычислительную сложность по сравнению с традиционными методами поиска экстремума [2,7]. При этом, как правило, причинам, порождающим упомянутые достоинства, должного внимания не уделяется. Вместе с тем желательно выявить эти причины и провести сопоставление не только с ОФК, но и другими алгоритмами, построенными на основе байесовского подхода. Такой анализ возможен вследствие того, что алгоритмы ФГО опираются на факторизацию условной (апостериорной) функции плотности распределения вероятностей оцениваемых параметров, которая является основой при построении оптимальных байесовских алгоритмов оценивания. Этот анализ позволит выявить возможный круг задач обработки навигационной информации, для которых применение алгоритмов ФГО наиболее эффективно, а также задачи, где существенного выигрыша по сравнению с байесовскими алгоритмами не добиться.

Таким образом, настоящая работа посвящена сопоставлению алгоритмов, построенных на основе методов ФГО и байесовских методов в задачах обработки навигационной информации. В первой части рассматриваются линейные и нелинейные задачи в общей постановке, во второй части рассматривается задача одновременной локализации и картографирования.

Сравнение методов. Множество задач оценивания обработки навигационной информации сводятся к линейной гауссовской постановке, т.е. оцениванию гауссовского вектора состояния, задаваемого линейным формирующим фильтром по его линейным измерениям с белым шумом гауссовской погрешностью. Оптимальным решением задачи фильтрации с позиций байесовского подхода в этом случае является фильтр Калмана. Также можно построить различные ал-

горитмы сглаживания в байесовском подходе, в частности алгоритм сглаживания Раух-Тунг-Штрибель (RTS-сглаживание). Можно показать, что решение этой же задачи с точки зрения методов ФГО приводит к алгоритмам, повторяющим RTS-сглаживание [16]. Это является следствием тривиальности фактор-графа в такой задаче, а также того, что в этом случае максимум апостериорной плотности совпадает с её математическим ожиданием. При этом следует обратить внимание, что алгоритмы, основанные на методах ФГО, являются именно алгоритмами сглаживания, и сравнение их с алгоритмами фильтрации, такими как фильтр Калмана не корректно.

Другой широкий класс задач – нелинейные задачи оценивания. С позиций байесовского подхода эти задачи могут быть решены с использованием линеаризации, например, путем разложения нелинейных функций в ряд Тейлора. Это приводит к субоптимальным алгоритмам таким как ОФК и сглаживающий ОФК. При построении алгоритмов на основе методов ФГО, зачастую используются те же методы линеаризации, что и в ОФК, при этом фактор-граф такой задачи остается тривиальным. Однако в ОФК реализуется рекуррентная схема обработки и линеаризация осуществляется для каждого измерения, в то время как в алгоритмах ФГО линеаризация проводится по результатам обработки всей накопленной пачки измерений. Последний случай предпочтителен, так как уменьшает погрешности линеаризации в силу того, что при накоплении измерений апостериорная функция плотности распределения вероятностей нормализуется и соответственно обеспечивается ее лучшая аппроксимация. Однако и в рамках байесовского подхода также используются нерекуррентные алгоритмы, обрабатывающие пачку измерений, в которых точка линеаризации корректируется аналогично ФГО по результатам обработки пачки измерений, и, более того, алгоритмы могут быть построены и с использованием других, более точных, методов представления апостериорной плотности [15, 17, 18].

Задача SLAM стоит особняком среди нелинейных задач обработки навигационной информации. Прямое применение стандартных байесовских алгоритмов для решения такой задачи приводит к ОФК с вектором состояния очень большой размерности, так как в вектор состояния должны быть включены все константы, описывающие карту. Матрица ковариаций такого вектора является заполненной, что делает ОФК в задаче SLAM вычислительно сложным. При подходе к SLAM с позиций ФГО, оказывается, что можно построить нетривиальный фактор-граф для каждой такой задачи, который соответствует специальной, отличной от традиционной факторизации апостериорной плотности. В результате это позволяет построить алгоритм, решающий задачу поэтапно, сначала – задачу локализации, а затем – задачу картографирования. При этом не требуется вычисления полной матрицы ковариаций для всего вектора состояния, что существенно снижает вычислительную сложность алгоритма [19].

Заключение. Показано, что алгоритмы на основе методов ФГО являются алгоритмами сглаживания максимизирующими апостериорную плотность вероятностей, что в линейной задаче, в общем случае эквивалентно байесовским алгоритмам оценивания. Таким образом, нельзя говорить о повышении точности и снижении вычислительной сложности алгоритмов ФГО относительно байесовских алгоритмов в таких задачах.

В нелинейных задачах выигрыш в точности алгоритмов ФГО относительно рекуррентных байесовских алгоритмов достигается за счет использования пачки измерений. Это в свою очередь, при накоплении измерений приводит к нормализации апостериорной функции плотности распределения и, как следствие, к ее лучшей аппроксимации. Отмечается, что и в рамках байесовского подхода легко получить алгоритмы, аналогичные алгоритмам ФГО. Более того, на основе байесовского подхода могут быть построены алгоритмы и с использованием других, более точных, методов представления апостериорной плотности.

Показано, что в ряде задач, содержащих в себе множество постоянных параметров, как, например задача SLAM, применение методов ФГО приводит к построению алгоритмов оценивания, которые вычислительно существенно проще, чем алгоритмы, построенные традиционными методами с позиций байесовского подхода без учета особенностей этих задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Q. Zeng, W. Chen, J. Liu, and H. Wang, "An Improved Multi-Sensor Fusion Navigation Algorithm Based on the Factor Graph," *Sensors*, vol. 17, p. 641, Mar. 2017.
2. E. Olson, "AXLE: Computationally-efficient trajectory smoothing using factor graph chains," 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Xi'an, China, 2021, pp. 7443-7448, doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561823.
3. Weisong Wen, Tim Pfeifer, Xiwei Bai Li-Ta Hsu. Factor graph optimization for GNSS/INS integration: A comparison with the extended Kalman filter. *NAVIGATION* 2021;68:315–331.
4. А. Ю. Филатов Масштабируемые алгоритмы одновременного построения карты и локализации стаи мобильных роботов. Автореферат дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук, Спб 2021.
5. Xiwei WU, Bing XIAO, Cihang WU, Yiming GUO, Lingwei LI. Factor graph based navigation and positioning for control system design: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. Volume 35, Issue 5, May 2022, Pages 25-39
6. Yanwu Zhai and Songyuan Zhang. A Novel LiDAR–IMU–Odometer Coupling Framework for Two-Wheeled Inverted Pendulum (TWIP) Robot Localization and Mapping with Nonholonomic Constraint Factors. *Sensors* 2022, 22, 4778. <https://doi.org/10.3390/s22134778>.
7. Jun Dai, Songlin Liu, Xiangyang Hao, Zongbin Ren and Xiao Yang. UAV Localization Algorithm Based on Factor Graph Optimization in Complex Scenes. *Sensors* 2022, 22, 5862.
8. Mingxing Chen , Zhi Xiong , Jun Xiong, d Rong Wang. A hybrid cooperative navigation method for UAV swarm based on factor graph and Kalman filter. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 2022, Vol. 18(1).
9. Shiji Xin, Xiaoming Wang , Jinglei Zhang, Kai Zhou 1 and Yufei Chen A Comparative Study of Factor Graph Optimization-Based and Extended Kalman Filter-Based PPP-B2b/INS Integrated Navigation. *Remote Sens.* 2023, 15, 5144. <https://doi.org/10.3390/rs15215144>.
10. A.A. Penkovsky, J. Mahmoud, M. Mohrat, and S.A. Kolyubin, "Robust visual-inertial odometry for ground robots in dynamic environments," 30th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, pp. 49–54, 2023.
11. D.A. Cherginets and A.A. Vedyakov, "Design of visual-inertial odometry algorithm for a four-legged walking robot with a stereo camera," 31st Saint Petersburg International conference on Integrated Navigation Systems, pp. 453–457, 2024.
12. А.Р. Абдрашитов. Относительная навигация группы беспилотных летательных аппаратов с применением байесовских оценок. Труды XIX Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» 2024.
13. S.H. Quan, S.H. Chen, Y.L. Zhou S. Zhao, H.Z. Hu, Q. Zhu A Robust IMU/GNSS/ODO Integrated Navigation System Based On Factor Graph. 31th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2024 - Proceedings. 27. 2024
14. В.Г. Караулов, А.М. Грузликов, О.А. Степанов, Ю.А. Литвиненко Решение задачи позиционирования АНПА относительно стационарной посадочной платформы с применением алгоритма оптимизации на фактор-графе. В сборнике: Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. сборник материалов конференции. Санкт-Петербург, 2024.
15. O. A. Stepanov, A. M. Isaev, A. V. Motorin, Yu. A. Litvinenko, and V. P. Zolotarevich, "Recursive and Nonrecursive Algorithms Applied to Navigation Data Processing: Differences and Interrelation with Factor Graph Optimization Algorithms," Proc. 31st St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 2024, pp. 424–432.
16. A. Aravkin, B. Bell, J. Burke, and G. Pillonetto, "Kalman smoothing and block tridiagonal systems: new connections and numerical stability results," arXiv, 2013, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1303.5237>.
17. О.А. Степанов Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации // СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор". 2003. 370 с.
18. В.А. Васильев, Ю.А., Литвиненко О.А. Степанов., А.Б. Торопов Сравнение рекуррентных и нерекуррентных алгоритмов фильтрации при решении задачи навигации по геофизическим полям В сборнике: XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ-2021. материалы XIV мультиконференции : в 4 т.. Ростов-на-Дону, 2021. С. 125-127.
19. F. Dellaert and GTSAM Contributors, "Georgia Tech Smoothing and Mapping Llibrary", <https://github.com/borglab/gtsam>, 2022.

O.A. Stepanov, Yu.A. Litvinenko, A.V. Motorin, A.M. Isaev (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, St. Petersburg, Russia). **Comparison of Bayesian estimation and factor-graph optimization methods**

Abstract. The paper considers the possibilities of constructing estimation algorithms with lower computational complexity in linear estimation problems using factor-graph optimization. The relationship and differences between the Bayesian approach and factor-graph optimization algorithms are considered. It is shown that the difference between these approaches may lie in different ways of factorizing the a posteriori probability density function. An example of recursive and nonrecursive estimation algorithms from the standpoint of factor-graph optimization and the Bayesian approach for one-dimensional and two-dimensional problems of simultaneous localization and mapping is given.

А. К. ГОЛУБЕВ, А. А. ПЫРКИН, В. М. ФОМИН
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

БЕЗДАТЧИКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

В работе решается задача бездатчикового управления асинхронным двигателем. Предлагается алгоритм управления, способный работать при параметрических и сигнальных неопределенностях. Предложенный алгоритм позволяет расширить область применения асинхронных двигателей в технических системах робототехнического назначения с изменяющейся нагрузкой и неполной информацией о параметрах модели. Работоспособность подтверждается результатами компьютерного моделирования.

Введение. Асинхронные двигатели широко используются в автоматизированных системах благодаря своей эффективности и надежности. Однако, при управлении ими традиционными методами, в условиях изменяющейся нагрузки, внешней и внутренней неопределенности возникают проблемы, в этом случае системы, использующие адаптивные алгоритмы управления обладают высоким показателем актуальности.

В данной работе предлагается алгоритм бездатчикового векторного управления дискретной моделью асинхронного двигателя. Предложенный алгоритм работает в широком спектре параметрической и сигнальной неопределенности, что делает его перспективным для использования в современных робототехнических системах, с повышенным требованием к точности и надежности, а также при недостатке априорной информации о режимах работы и условиях эксплуатации.

Основной текст. Динамическая модель асинхронного двигателя в неподвижной системе координат, связанной со статором, в непрерывном времени описывается следующими уравнениями [1]:

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} &= -\left(\frac{R_r}{L_r} \mathbf{I} - n_p \mathbf{J} \omega\right) \lambda + \frac{R_r L_m}{L_r} i, \\ \frac{di}{dt} &= -\left(\frac{R_s}{L_s \sigma} + \frac{R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2}\right) i + \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} \left(\frac{R_r}{L_r} \mathbf{I} - n_p \mathbf{J} \omega\right) \lambda + \frac{1}{\sigma L_s} v, \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{D} (\tau - \tau_L), \end{aligned} \quad (1)$$

где: λ – потокосцепление ротора; i – сила тока статора; v – напряжение питания статора; ω – скорость вращения ротора; R_r и L_r – сопротивление и индуктивность ротора, соответственно; R_s и L_s – сопротивление и индуктивность статора, соответственно; L_m – взаимоиנדукция; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ – коэффициент утечки индуктивности; n_p – количество пар полюсов; D – момент инерции, приведенный к валу двигателя; τ – электромагнитный момент двигателя; τ_L – момент нагрузки; \mathbf{I} – единичная матрица; $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$.

Как видно, модель (1) нелинейная, что, в значительной мере, усложняет синтез регуляторов. При практической реализации, в контуре силы тока используется регулятор с большим коэффициентом усиления:

$$v = \frac{1}{\epsilon} (i^d - i), \quad (2)$$

где: i^d – желаемое значение силы тока статора; ϵ – небольшое положительное число.

В предельном случае коэффициент ϵ в уравнении (2) стремится к 0 и модель двигателя (1) упрощается. Выполняя переход во вращающуюся с ротором систему координат и дискретизируя модель двигателя, получают [2, 3]:

$$\begin{aligned} \lambda_{k+1} &= a \lambda_k + (1 - a) u_k, \\ \tau_k &= b u_k^T \mathbf{J} \lambda_k, \end{aligned} \quad (3)$$

¹ Научный руководитель: д.т.н., проф. Пыркин А.А.

$$\omega_{k+1} = \omega_k + c\tau_k - d\tau_L,$$

где: $a = e^{\frac{-R_r T}{L_r}}$; $b = \frac{n_p}{L_r}$; $c = \frac{(1-a)L_r}{DR_r}$; $d = \frac{T}{D}$; T – период дискретизации; u – напряжение статора во вращающейся системе координат.

Принимая допущение о том, что известны индуктивность ротора L_r и нижняя граница момента инерции D , получаются уравнения адаптивного дискретно-временного регулятора:

$$\begin{aligned} u_k &= e^{J\rho_k^d} \left(\frac{\Psi_{k+1}^d}{1-\hat{a}} \cos(\beta_k) - \frac{\hat{a}}{1-\hat{a}} \Psi_k^d \frac{L_r}{\Psi_k^d n_p} \tau_k^d \right), \\ \rho_{k+1}^d &= \rho_k^d + \beta_k, \\ \beta_k &= \arcsin \left(\frac{L_r(1-\hat{a})}{n_p \Psi_{k+1}^d \Psi_k^d} \tau_k^d \right), \\ \tau_k^d &= C(z)(\omega^d - \omega_k), \\ C(z) &= K_p + K_I \frac{z}{1-z}, \end{aligned} \quad (4)$$

где: Ψ^d – желаемое значение амплитуды потокосцепления ротора; τ^d – желаемое значение момента; ω^d – желаемое значение скорости вращения ротора; $a = e^{\frac{-\hat{R}_r}{L_r}}$; \hat{R}_r – значение оценки сопротивления ротора, получаемое, например, с использованием метода динамического расширения и смешивания регрессора [4]; K_p , K_I – значения пропорционального и интегрального коэффициентов регулятора момента.

Заменяя, в уравнениях (4) значение скорости вращения ротора его оценкой, полученной, с использованием наблюдателя, алгоритм которого приведен в [4, 5], получается, что алгоритм (4) не требует непосредственной информации о скорости вращения ротора, тем самым становясь бездатчиковым.

На рисунке 1 представлены результаты компьютерного моделирования в среде MATLAB/Simulink предложенного алгоритма бездатчикового управления асинхронным двигателем. В качестве исходных данных использовались следующие значения параметров двигателя: $L_s = L_r = 420$ мГн, $L_m = 117$ мГн, $R_s = R_r = 2,76$ Ом, $D = 0,06$ кг*м², $\Psi^d = 0,0455$ Вб, $\omega^d = 50$ рад*с⁻¹, $n_p = 2$. Период дискретизации T принимался равным 1 секунда, а момент нагрузки τ_L равным 0,1 Н*м. Моделирование проводилось в сценариях с параметрическими и сигнальными неопределенностями.

Заключение. В результате работы был синтезирован алгоритм бездатчикового адаптивного управления дискретной моделью асинхронного двигателя. Предложенный алгоритм продемонстрировал хорошую работу в условиях различного рода неопределенностей модели двигателя. В качестве перспектив использования алгоритма выделяются различные приложения в робототехнических задачах, где возможны неточные знания о значениях параметров модели, при зашумленности измеряемых электрических сигналов, а также невозможности использования датчика положения ротора. В дальнейшем планируется ужесточить часть из введенных допущений, а также экспериментально верифицировать представленные результаты на реальных технических установках.

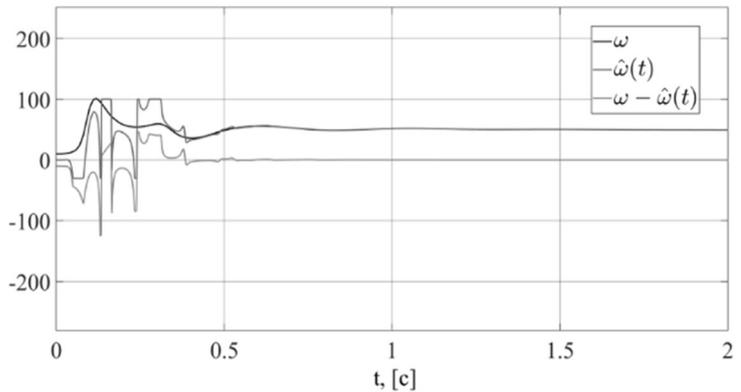


Рис. 1. Результаты моделирования в бездатчиковом режиме

ЛИТЕРАТУРА

1. Pyrkin A., Bobtsov A., Vedyakov A., Ortega R., VEDIKOVA A., Sinetova M. A flux and speed observer for induction motors with unknown rotor resistance and load torque and no persistent excitation requirement // *Intern. Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2021. Vol. 35, N 8. P. 1578–1593.
2. Romeo O., Damia T. On Discrete-time Control of Current-fed Induction Motors // *System & Control Letters*. – 1996. – Т. 28, №3. – С. 123-128.
3. Нгуен К. К., Пыркин А. А., Голубев А. К. Алгоритмы бездатчикового управления асинхронным двигателем с использованием адаптивных наблюдателей // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2024. Т. 67, № 7. С. 551–558. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-551-558.
4. Pyrkin, A., Q. C. Nguyen, M. Sinetova, R. Ortega, and A. Bobtsov. 2024. “Adaptive Field-Oriented Control of Current-Fed Induction Motors: A Discrete-Time Implementation.” *International Journal of Control*, July, 1–11. doi:10.1080/00207179.2024.2368056.
5. Pyrkin A., Bobtsov A., Vedyakov A., Ortega R., Vedyakova A., Sinetova M.M. DREM-Based Adaptive Observer for Induction Motors // *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2019, pp. 648-653.

A. K. Golubev, A. A. Pyrkin, V. M. Fomin (ITMO University, Saint Petersburg). **Sensorless Control of Induction Motor**

Abstract. In this paper, solves the problem of sensorless control of induction motor. A control algorithm able to operate under parametric and signal uncertainty is proposed. The proposed algorithm allows to expand the application area of induction motors in robotic technical systems with changing load and incomplete information about the parameters of the model. The performance is confirmed by the results of computer modeling.

В. А. БОЛОТИНА, Д. П. АВАРЯСКИН

(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛУНЫ НА ИНСПЕКЦИОННОЕ ДВИЖЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ВЫСОКИХ ОРБИТАХ

В работе для обеспечения инспекционного движения используются начальные условия, обеспечивающие замкнутые относительные траектории при невозмущённом движении. Учёт влияния возмущения в виде гравитационного поля Луны приводит к эволюции относительной траектории, и она перестаёт быть замкнутой. Проведено исследование эволюции инспекционной траектории под действием гравитационного поля Луны.

Введение. Для решения научных и прикладных задач в космосе используется технология группового полёта, одним из видов которого является инспекционное движение космических аппаратов (КА). Инспекционное движение используется для облёта объекта инспекции (далее – опорный КА) инспектором с целью получения необходимой информации, осмотра и диагностики без прямого контакта [1]. Также инспектор может сближаться и с космическим мусором для его осмотра или увода с орбиты.

Основным вопросом в задаче инспектирования является выбор начальных условий группового полёта. В случае невозмущённого движения начальные условия, которые обеспечивают замкнутую относительную траекторию находятся из условия равенства орбитальных энергий опорного КА и инспектора. Однако под влиянием различных возмущений траектория перестаёт быть замкнутой, что приводит к разрушению инспекционного движения.

Данная работа посвящена исследованию влияния гравитационного поля Луны на формирование инспекционного движения космических аппаратов на высоких орбитах. То есть проводилось исследование различных начальных условий движения инспектора и опорного КА, при которых отклонение относительной траектории от номинальной (невозмущённой) под действием влияния гравитационного поля Луны будет минимальным.

Математическое моделирование относительного движения. В данной работе будет рассмотрено влияние гравитационного поля Луны на инспекционное движение в случае, когда опорный КА движения по геостационарной орбите и орбите «Молния». Инспекционное движение обеспечивается в плоскости рассматриваемых орбит.

Замкнутые относительные траектории, используемые для обеспечения инспекции одного КА другим, можно получить путём выбора начальных условий движения инспектора. При этом начальные условия должны выбираться так, чтобы выполнялось условие формирования замкнутой относительной траектории: периоды обращений каждого КА по своей орбите вокруг притягивающего центра должны быть равны:

$$T_{\text{оп}} = T_{\text{и}}, \quad (1)$$

где: $T_{\text{оп}}$, $T_{\text{и}}$ – периоды обращения по своим орбитам опорного КА и инспектора соответственно.

Введём две системы координат: абсолютную геоцентрическую систему координат (АСК) и орбитальную барицентрическую систему координат (ОСК). Рассмотрим возмущённое движение двух КА – опорного и инспектора. Центр масс опорного КА является началом ОСК. Модель движения опорного КА и инспектора в АСК с учётом влияния гравитационного поля Луны записываются, соответственно, в виде

$$\ddot{\vec{r}}_{\text{оп}} + \frac{\mu}{r_{\text{оп}}^3} \vec{r}_{\text{оп}} = \vec{f}_{\text{л}}, \quad \ddot{\vec{r}}_{\text{и}} + \frac{\mu}{r_{\text{и}}^3} \vec{r}_{\text{и}} = \vec{f}_{\text{л}}, \quad (2)$$

где $\ddot{\vec{r}}_{\text{оп}}$ – ускорение опорного КА; $\mu = 398602 \text{ км}^3/\text{с}^2$ – гравитационный параметр Земли; $\vec{r}_{\text{оп}}$ – радиус-вектор опорного КА; $\vec{f}_{\text{л}}$ – возмущающее ускорение, вызванное притяжением Луны; $\ddot{\vec{r}}_{\text{и}}$ – ускорение инспектора; $\vec{r}_{\text{и}}$ – радиус-вектор инспектора.

Начальные условия движения инспектора определяются из выражения связи АСК и ОСК:

$$V_{\text{и}}^2 = (v_{x0} + V_{\text{ноп}} + \omega_{\text{оп}} y_0)^2 + (v_{y0} + V_{\text{роп}} - \omega_{\text{оп}} x_0)^2, \quad (3)$$

где $\omega_{оп}$ – угловая орбитальная скорость опорного КА; $V_{ноп}$, $V_{rоп}$ – нормальная и радиальная проекции скорости опорного КА; $v_{y0} = \frac{\omega_{оп} x_0}{2}$ – компонента начальной скорости инспектора [2],

$V_{и} = \sqrt{\frac{2\mu}{r_{и}} - \frac{\mu}{a_{оп}}}$ – начальная скорость инспектора в ОСК, $r_{и} = \sqrt{X_{и}^2 + Y_{и}^2 + Z_{и}^2}$ – величина радиуса-вектора инспектора. При этом выполнение (1) обеспечивается выбором такой скорости инспектора, чтобы большие полуоси орбит инспектора и опорного КА были равны. Тогда относительная траектория будет замкнутой. Это справедливо только для случая невозмущённого движения. В связи с тем, что в рамках данной работы учитывается влияние гравитационного поля Луны, то реальная траектория не будет замкнутой. Поэтому вводится параметр, который будет использоваться для оценки влияния этого возмущения. В качестве оценочного параметра принимается максимальное отклонение инспекционной возмущенной траектории от невозмущенной относительной траектории Δr_{max} при одинаковых начальных условиях движения:

$$\Delta r_{max} = r_{maxB} - r_{maxH}, \quad (4)$$

где r_{maxB} – максимальное расстояние между опорным КА и инспектором на возмущенной траектории, м; r_{maxH} – максимальное расстояние между опорным КА и инспектором на невозмущенной траектории, м.

С помощью (4) были найдены максимальные отклонения инспекционной возмущенной от невозмущенной относительной траектории. Проведено исследование влияния начального положения Луны и опорного КА на инспекционное движение КА. Максимальное влияние Луны происходит при аргументах широты Луны от 75 до 125 градусов и от 260 до 320 градусов и при аргументах широты опорного КА от -40 до 20 градусов на орбите типа «Молния».

Также проведено исследование влияния начального положения инспектора на формирование инспекционного движения с учётом влияния Луны. Начальное положение задавалось углом α , отсчитываемым от оси Ox ОСК до текущего положения инспектора. Исследование показало, что влияние Луны на инспекционное движение максимально в случае, когда опорный КА и инспектор находятся на одном радиус-векторе. По результатам моделирования был построен график, отражающий зависимость максимального влияния Луны от начальных положений инспектора (рис. 1).

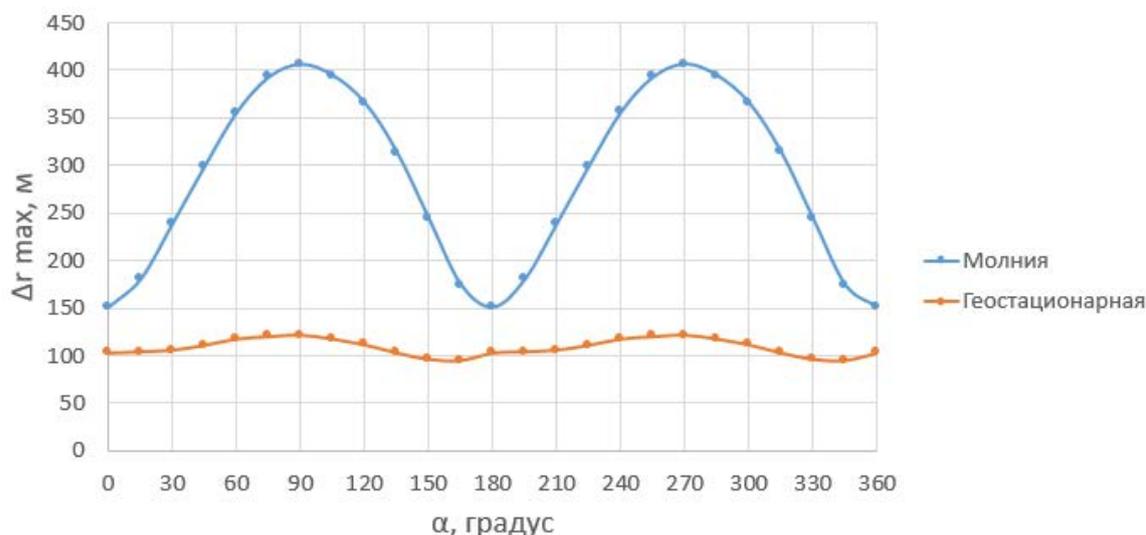


Рис. 1. Максимальное влияние Луны в зависимости от начального положения инспектора

Заключение. Проведено исследование влияния гравитационного поля Луны на формирование инспекционного движения космических аппаратов на высоких орбитах. Получены диапазоны аргументов широты Луны и опорного КА при которых влияние Луны максимально.

Исследование влияния гравитационного поля Луны на формирование инспекционного движения в зависимости от положения инспектора относительно опорного КА показало, что оно максимально, когда оба КА находятся на одном радиусе-векторе. На инспекционную траекторию при движении по геостационарной орбите не имеет выраженных максимумов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Щербаков М.С., Медведев С.А.** Исследование возможности применения оскулирующих элементов относительного движения в задаче инспекции // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2022. №4
2. **Scherbakov M. S., Avariaskin D. P.** Studying problems on choosing stable orbits of nanosatellites to provide passive and periodic relative trajectories // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Т. 1536, №1. – 8 с.

V.A. Bolotina, D.P Avariaskin (Samara National Research University, Samara). **Study of the influence of the Moon on the inspection motion of spacecraft in high orbits**

Abstract. In this work, initial conditions are used to ensure inspection motion, providing closed relative trajectories with unperturbed motion. Taking into account the influence of perturbation in the form of the gravitational field of the Moon leads to the evolution of the relative trajectory, and it ceases to be closed. A study of the evolution of the inspection trajectory under the influence of the gravitational field of the Moon is conducted.

О.С. ЮЛЬМЕТОВА

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

М.А. ТИТ, А.Г. ЩЕРБАК

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

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ УЗЛОВ

Отражен опыт создания прогрессивных технологических решений по корректировке дисбаланса и нанесению контрастного рисунка на поверхность прецизионных сферических узлов, используемых в гироскопическом приборостроении.

Введение. Сферические узлы, к которым предъявляются жесткие требования по точности формы и дисбалансу, являются основой наиболее перспективных изделий гироскопического приборостроения [1,2]. Не менее важной технологической задачей является процесс нанесения контрастных рисунков, определяющих функционирование оптоэлектронной системы съема информации [1]. Оригинальность подходов, представленных в работе, основана на решении указанных задач за счет применения методов лазерной обработки.

Технология изготовления сферических узлов. Сферический узел представляет собой прецизионную бериллиевую сферу с выраженным моментом инерции, создаваемым формированием в теле узла армирующих элементов [3], с дисбалансом, нормируемым сотыми долями микрометров, и контрастным рисунком, сформированным на поверхности узла. Технология изготовления сферических узлов включает ряд последовательных операций, определяющих перераспределение масс и структурно-фазовую модификацию материала. Указанные процессы достаточно полно описываются с использованием аппарата химической термодинамики [4, 5].

При этом традиционные методы балансировки, основанные на применении направленной доводки [6], не всегда обеспечивают требуемые дисбаланс и точность формы сферических узлов.

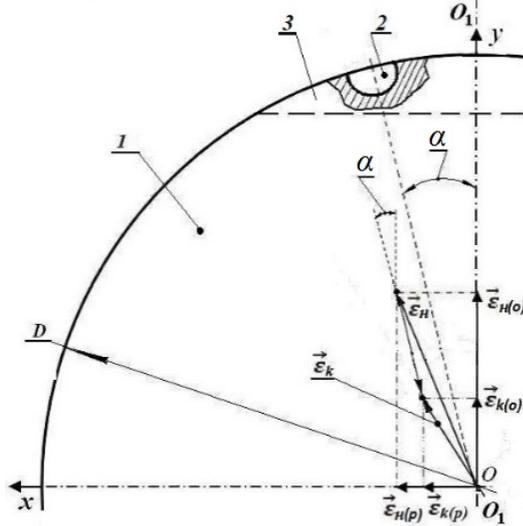


Рис. 1. Схема корректировки дисбаланса. 1 – сферический узел, 2 – выемка, 3 – сферический сегмент, в котором выполняется выемка.

положения выемки, заданного углом наклона α , определяемым соотношением:

$$\alpha = \arctg \frac{\epsilon_n(p) - \epsilon_k(p)}{\epsilon_n(o) - \epsilon_k(o)}, \text{ где } \vec{\epsilon}_n(p) \text{ и } \vec{\epsilon}_k(p) \text{ радиальные составляющие векторов начального}$$

и конечного дисбалансов, соответственно.

Финишной операцией в цикле изготовления бериллиевого сферического узла является формирование контрастного изображения. Эволюцию этого процесса можно представить следую-

В данной работе **корректировку дисбаланса** осуществляли локальным испарением точечной массы с поверхности сферического узла [7] до получения требуемого конечного дисбаланса ϵ_k , при угле наклона α оси выполняемой выемки к оси симметрии O_1O_1 сферического узла 1 (рис.1). При этом создают условия, когда лазерное испарение заданной массы m и образование точечной выемки 2 осуществляется за пределами зоны растрового рисунка, а масса m , определяется из соотношения $m = 2M \frac{\epsilon_n(o) - \epsilon_k(o)}{D \cos \alpha}$, где M – масса и D – диаметр сферического узла, $\vec{\epsilon}_n(o)$ и $\vec{\epsilon}_k(o)$ – осевые составляющие векторов начального $\vec{\epsilon}_n$ и конечного $\vec{\epsilon}_k$ дисбалансов, соответственно. Важным фактором является определение

шим образом: электрохимический метод (до с 2012 г.) [8, 9], имеющий ограничения по достигаемым оптическим параметрам рисунка и снижающий точность формы сферического узла, и лазерное маркирование (с 2012 г. по настоящее время) [10,11].

Лазерная технология обеспечила ряд преимуществ по качеству наносимого рисунка, в том числе равномерность контраста получаемого рисунка, а также минимизацию искажений формы сферического узла по сравнению с электрохимическим методом [7].

При этом образование рисунка на поверхности бериллия хорошо описывается аппаратом химической термодинамики [3], который может служить основой для дескриптивной модели процесса лазерной обработки. Моделирование связано с расчетом значений энергии Гиббса для возможных взаимодействий в системе металлическая поверхность - компоненты газовой среды:

$$\Delta Z_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T \cdot \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T C_p dt - T \cdot \int_{298}^T 1/T \Delta C_p dt + RT \ln P_g^{-k},$$

где C_p – теплоемкость; T – температура; P_g – относительное парциальное давление участвующего в реакции компонента g газовой среды, R – универсальная газовая постоянная, k – стехиометрический коэффициент.

Сравнение значений энергии Гиббса и выбор химической реакции, имеющей наименьшее значение этого показателя, позволяет определить фазовый состав соединения, образующего контрастный рисунок в ходе лазерной обработки на поверхности сферического узла [2, 3]. А варьирование парциальными давлениями компонентов газовой среды в ходе лазерной обработки позволяет изменять поверхностную проводимость сферического узла в зоне рисунка, что наглядно демонстрируют кривые дифференциальной проводимости, полученные методом сканирующей зондовой микроскопии (NT-MDT Nanoeducator) (рис. 2). Анализ значений энергий Гиббса показывает, что после лазерного маркирования бериллия в среде азота состав лазерного раstra определяет оксид Be_3N_2 [5], что полностью согласуется с данными рентгенофазового анализа (рис.3).

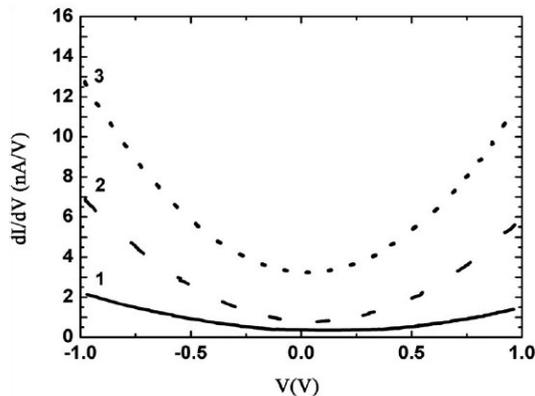


Рис. 2 Кривые дифференциальной проводимости лазерного рисунка, сформированного в воздушной среде (1), в среде азота (2) и базовой поверхности бериллия (3)

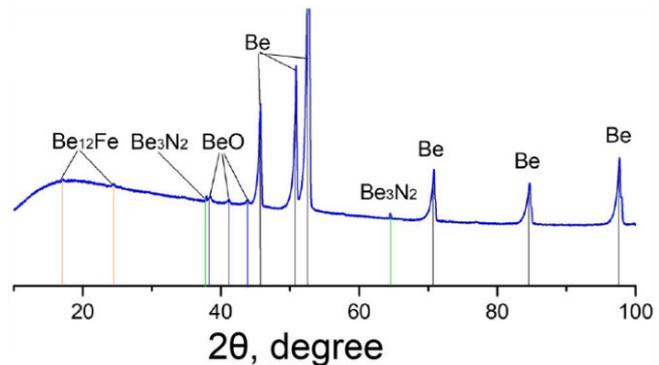


Рис. 3 Дифрактограмма лазерного рисунка, полученного при обработке бериллиевого сферического узла в среде азота

Заключение. На примере прецизионного сферического узла показана эффективность применения методов лазерной обработки при формировании наиболее важных функциональных параметров узла при его изготовлении. В качестве инструментария для моделирования технологических процессов по корректировке дисбаланса использованы математические модели, описывающие взаимосвязь между параметрами сферического узла и геометрическим расположением испаряемой массы. Предложено использование аппарата химической термодинамики для исследования контрастных изображений, получаемых методом лазерной модификации поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ландау Б.Е.** Электростатический гироскоп со сплошным ротором. - СПб.: ГНЦ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020.-150 с.
2. **Landau B.E. et al** 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1864012008
3. **Пат. 2286535 РФ.** Способ изготовления ротора шарового гироскопа/ Беляев С.Н., Ландау Б.Е., Буцык А.Я. и др. // Бюл. – 2006. – №7.
4. **Yulmetova O.S., Scherbak A.G.** Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optoelectronic read-out system. *Optics and laser technology*. 2018. Vol. 101. pp. 242–247.
5. **Yulmetova O.S., Scherbak A.G.** Composition analysis of thin films formed on beryllium surfaces under pulsed laser action by the method of chemical thermodynamics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97. No. 9–12. pp. 3231–3236.
6. **Filippov A.Yu., Fedorovich S.N., Shcherbak A.G. Integrated approach to the technology of manufacturing electrostatic gyro rotors.** *Journal of Physics: Conference Series*. 13th Multiconference on Control Problems, MSCP 2020. 2021. С. 012023
7. **Пат. 2592748 РФ.** Способ изготовления ротора электростатического гироскопа / О. С. Юльметова, А.Г. Щербак, А.Ю. Филиппов, Б.Е. Ландау и др. // Бюл. – 2016. – № 21.
8. **Агроскин Б.Н., Галлай В.И. и др.** Сравнительная оценка электрохимического и фотохимического методов формообразования светоконтрастного рисунка на роторе бескарданного электростатического гироскопа. Гироскопия и навигация. 1996. № 3. С.39–45.
9. **Yulmetova O.S., Tit M.A., Sisyukov A.N., Yulmetova R.F.** Comparative analysis of electrochemical and laser marking for gyroscopic application. Proc. of the 2020 IEEE Conference of Russian Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), 2020, pp. 1053–1055.
10. **Пат. 2498224 РФ.** Способ изготовления ротора электростатического гироскопа / О.С. Юльметова, А.Г. Щербак, А.Я. Буцык, Б.Е. Ландау, В.П. Вейко, В.А. Валетов // Бюл. – 2013. – №31.
11. **Пат. 2812538 РФ.** Способ изготовления ротора электростатического гироскопа / Федорович С.Н., Филиппов А.Ю., Щербак А.Г., Леонова Т.Г. // Бюл. – 2024. – №3.

O. S. Yulmetova, (JSC "Concern "Central Research Institute "Elektropribor", ITMO-University, St. Petersburg, Russia), M.A. Tit, A. G. Scherbak (JSC "Concern "Central Research Institute "Elektropribor", St. Petersburg, Russia). **Experience in developing a technology for manufacturing precision spherical units**

Abstract. The experience of creating progressive technological solutions for correcting imbalance and applying a contrasting pattern to the surface of precision spherical units used in gyroscopic instrumentation is reflected.

В.В. ПОТЕХИН, Е.В. КУКЛИН, П.К. СМИРНОВ
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург)

УПРАВЛЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫМИ РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ СИСТЕМАМИ НА БАЗЕ ОТКРЫТЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В данной работе рассматривается стандарт Open Process Automation Standard (OPAS), который предназначен для промышленных автоматизированных систем. Анализируется различие между информационными технологиями (ИТ) и операционными технологиями (ОТ), а также основные проблемы, с которыми сталкивается сектор ОТ в настоящее время. Обсуждаются существующие прототипы и тестовые стенды OPAS, демонстрирующие возможность применения открытых стандартов в промышленности. Работа подчеркивает важность перехода к открытым архитектурам, способствующим совместному развитию и инновациям в области автоматизации.

Введение. С появлением концепции открытого программного обеспечения и открытых архитектур, бизнес-структуры и методы работы организаций претерпевают значительные изменения. В то время как в области информационных технологий наблюдается стремительный рост открытых решений, в сфере операционных технологий (ОТ) все еще преобладают проприетарные системы. Ограничения, связанные с закрытыми интерфейсами и отсутствием совместимости между устройствами разных производителей, тормозят развитие сектора. В связи с этим, Open Process Automation Forum (OPAF) разрабатывает стандарт OPAS, направленный на создание открытых решений для автоматизации процессов.

Управление процессом реабилитации в медицинских киберфизических системах. Информационные технологии (ИТ) охватывают системы и инструменты, используемые для обработки и управления данными, включая программное обеспечение, сервера и сети. Операционные технологии (ОТ), в свою очередь, связаны с управлением физическими процессами и системами, такими как производственные линии, энергетические сети и транспортные системы. Основное различие между ними заключается в том, что ИТ в большей степени ориентированы на данные и информацию, тогда как ОТ сосредоточены на физическом взаимодействии с окружающим миром. Несмотря на различия, ИТ и ОТ начинают пересекаться, особенно в контексте концепций интернета вещей (IoT) и промышленного интернета вещей (IIoT), что требует от организаций пересмотра своих стратегий и подходов к разработке систем.

Основные проблемы, с которыми сталкивается сектор ОТ, включают:

1. **Закрытые системы:** Проприетарные решения ограничивают возможности интеграции и совместной работы различных устройств и платформ.
2. **Долгий срок службы оборудования:** Устаревшие технологии могут быть сложно модернизировать, что мешает внедрению новых решений.
3. **Безопасность:** Увеличение числа подключенных устройств создает новые уязвимости и риски для безопасности производственных систем.

Переход к открытым стандартам в сфере ОТ обеспечивает следующие преимущества:

- **Увеличение совместимости:** Открытые интерфейсы позволяют устройствам от различных производителей работать в одной системе.
- **Снижение затрат:** Использование открытых решений снижает зависимость от конкретных поставщиков и уменьшает затраты на лицензирование.
- **Ускоренное внедрение новых технологий:** благодаря открытым стандартам разработчики могут быстрее адаптировать и внедрять новые решения.

Заключение. Стандарт OPAS представляет собой важный шаг в направлении модернизации и открытости операционных технологий. Переход к открытым архитектурам может решить многие текущие проблемы сектора ОТ, включая интеграцию, безопасность и инновации. Внед-

рение таких стандартов позволит организациям не только улучшить свои производственные процессы, но и создать более конкурентоспособные и адаптивные бизнес-модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Потехин В.В., Алексеев А.П., Куклин Е.В., Мисник А.Е., Хитрова А.Д.**, Programming of open distributed industrial systems based on the international standard IEC 61499 / Computing, telecommunications and control, 2024, pp. 12-13
2. **Потехин В.В., Алексеев А.П., Куклин Е.В., Хитрова А.Д., Кожубаев Ю.Н.**, Cloud distributed control system based on open process automation platform / Computing, telecommunications and control, 2023, pp. 19-21
3. **Zoiti, T., Strasser, C., Sunder, Baier T.** Is IEC 61499 in harmony with IEC 61131-3? IEEE Ind. Electron. Mag. 2009, Vol. 3, pp. 49–55.
4. **Church P., Mueller H., Ryan C., Gogouvitis S.V., Goscinski A., Tari Z.** Migration of a SCADA system to IaaS clouds – a case study. Church et al. Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications. 2017, pp. 6-12.
5. **O-PAS Standard, Version 2.1: Part 1** – Technical Architecture Overview, pp. 6-10.
6. **O-PAS Standard, Version 2.1: Part 1** – Technical Architecture Overview, pp. 12-17.

V. V. Potekhin, E. V. Kuklin, P. K. Smirnov (Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University", Saint Petersburg). **Management of industrial distributed systems based on open information technologies.**

Abstract. This paper discusses the Open Process Automation Standard (OPAS), which is intended for industrial automated systems. The article analyzes the difference between information technology (IT) and operational technology (OT), as well as the main problems that the OT sector currently faces. The article discusses existing OPAS prototypes and test stands that demonstrate the possibility of using open standards in industry. The paper highlights the importance of moving to open architectures that foster collaborative development and innovation in automation.

А. В. БРАГИН
(МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва)

ОЦЕНИВАНИЕ ДРЕЙФОВ ГИРОСКОПОВ ПО ИНФОРМАЦИИ О НУЛЕВОЙ СКОРОСТИ В ЗАДАЧЕ НАВИГАЦИИ ПЕШЕХОДА

Рассматривается система навигации пешехода на основе инерциальных датчиков, закрепленных на стопах. Исследуется задача оценки дрейфов гироскопов по информации о нулевой скорости при использовании упрощенных уравнений движения. Показано, что несмотря на наблюдаемость дрейфов гироскопов их оценивание обобщенным фильтром Калмана не позволяет получить приемлемых результатов.

Введение. Автономная навигация пешехода востребована в различных областях человеческой деятельности: в военном деле, при организации поисково-спасательных работ. В работе рассматривается система навигации пешехода на основе микромеханических инерциальных датчиков, закрепленных на стопах. Такая конфигурация позволяет использовать для коррекции информацию о нулевой скорости стопы в фазе опоры. Коррекция по нулевой скорости позволяет значительно снизить ошибки навигации, но не решает проблемы накопления ошибки угла курса. Одна из причин роста ошибки угла курса – смещения нулевых сигналов (или дрейфы) гироскопов, которые необходимо оценивать и компенсировать.

Общепринятым подходом в инерциальной навигации является оценка инструментальных погрешностей датчиков. Для низкоточных микромеханических датчиков она особенно актуальна, однако в научном сообществе нет единого мнения относительно качества оценок смещений гироскопов при коррекции по нулевой скорости. Авторы [1] утверждают, что ошибки моделирования в системе вносят больший вклад, чем погрешности датчиков и потому их оценивание нецелесообразно. Авторы [2] на основе обработки реальных экспериментов разными алгоритмами делают вывод о положительном эффекте от оценки дрейфов лишь в некоторых условиях. Авторы [3] на основе обработки имитационных данных делают вывод о «слабой наблюдаемости» смещений гироскопов.

В работе доказано, что смещения гироскопов при коррекции по нулевой скорости являются наблюдаемыми при использовании упрощенных уравнений движения. Также на имитационных данных показано, что, несмотря на наблюдаемость оценки смещений для гироскопа, направленного «вверх» не сходятся к заданным значениям за разумное время.

Оценивание смещений гироскопов. Приведем уравнения движения и соответствующие им уравнения ошибок:

$$\begin{aligned}
 \dot{p}'_n &= v'_n & \dot{\delta p}_n &= \delta v_n + \hat{p}'_n C'^T_{sn} (\Delta v_s^0 + v_s^s) & f'_s &= f_s + \Delta f_s \\
 \dot{v}'_n &= C'^T_{sn} f'_s + g_n, & \dot{\delta v}_n &= \hat{g}_n \beta_n + \Delta f_n + \hat{v}'_n C'^T_{sn} (\Delta v_s^0 + v_s^s), & \omega'_s &= \omega_s - v_s \\
 \dot{C}'_{sn} &= (\hat{\omega}'_s + \hat{v}'_s^0) C'_{sn} & \dot{\beta}_n &= C'^T_{sn} (\Delta v_s^0 + v_s^s) & v_s &= v_s^0 + \Delta v_s + v_s^s \\
 \dot{v}_s^0 &= 0 & \dot{\Delta v}_s^0 &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

где p'_n, v'_n обозначают координаты и скорости в навигационной системе координат (с.к.), C'_{sn} обозначает матрицу перехода от навигационной с.к. к приборной, $\delta p_n, \delta v_n$ обозначают т.н. динамические ошибки координат и скоростей [4], β_n обозначает ошибку ориентации. f'_s, ω'_s обозначают измерения акселерометров и гироскопов, $\Delta f_s, v_s$ – погрешности измерений, v_s^0, v_s^s отвечают за постоянные и случайные составляющие дрейфа гироскопов, а Δv_s^0 обозначает ошибку оценки постоянного смещения гироскопов. При записи уравнений движения считается, что Земля плоская и не вращается [5], эти допущения широко используются в навигации пешехода.

К системе (1) добавляются измерения нулевой скорости, формирующиеся при обнаружении фазы опоры. Фаза опоры определяется при помощи алгоритма SHOE [6].

$$\begin{aligned} Z' &= v'_n & z = Z' - Z &= \delta v_n + r_n = Hx + r_n, & x &= \begin{pmatrix} \delta p_n^T & \delta v_n^T & \beta_n^T & \Delta v_s^{0T} \end{pmatrix}^T \\ Z &= v_n - r_n, & H &= \begin{bmatrix} 0_3 & I_3 & 0_3 & 0_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

где Z, Z' обозначают измерения в терминах вектора состояния, z – измерение в терминах вектора ошибок, r_n – ошибку измерения, H – матрицу измерений, соответствующую вектору состояния ОФК x . К системе из уравнений ошибок и уравнений измерений применяется обобщенный фильтр Калмана.

Анализ наблюдаемости. Анализ наблюдаемости проводится в упрощающих предположениях: во-первых, все шаги пешехода одинаковы, во-вторых, фаза опоры мгновенна. Приводится матрица наблюдаемости для системы с вектором состояния $x = \begin{pmatrix} \delta v_n^T & \beta_n^T & \Delta v_s^{0T} \end{pmatrix}^T$, поскольку ошибка координат заведомо ненаблюдаема:

$$\mathcal{O}_k = \begin{bmatrix} HF^k \\ \dots \\ HF \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3 & k\hat{g}_n^T & k(\hat{g}_n C_2 + C_3) + \frac{k(k-1)}{2} \hat{g}_n^T C_1 \\ I_3 & \hat{g}_n^T & \hat{g}_n C_2 + C_3 \\ I_3 & 0_3 & 0_3 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} C_1 &= \int_{\tau=t_k}^{t_{k+1}} C'_{ns}(\tau) d\tau \\ C_2 &= \int_{\tau=t_k}^{t_{k+1}} d\tau \int_{s=t_k}^{\tau} C'_{ns}(s) ds \\ C_3 &= \int_{\tau=t_k}^{t_{k+1}} \hat{v}'_n(\tau) C'_{ns}(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (3)$$

Можно показать, что ненаблюдаемое подпространство матрицы \mathcal{O}_k содержит только вектор $v = \begin{pmatrix} 0_{1 \times 3} & g_n^T & 0_{1 \times 3} \end{pmatrix}^T$, то есть ненаблюдаема только переменная β_3 .

Оцениваемость дрейфов гироскопов на данных имитатора. Проверка алгоритма оценивания происходит на данных имитатора, подобного предложенному в [3]. Координаты и углы ориентации стопы моделируются гармоническими функциями. Скорость в фазе опоры точно равна нулю. Углы крена и тангажа в фазе опоры выбирались различными для имитации различного положения инерциального блока на стопе.

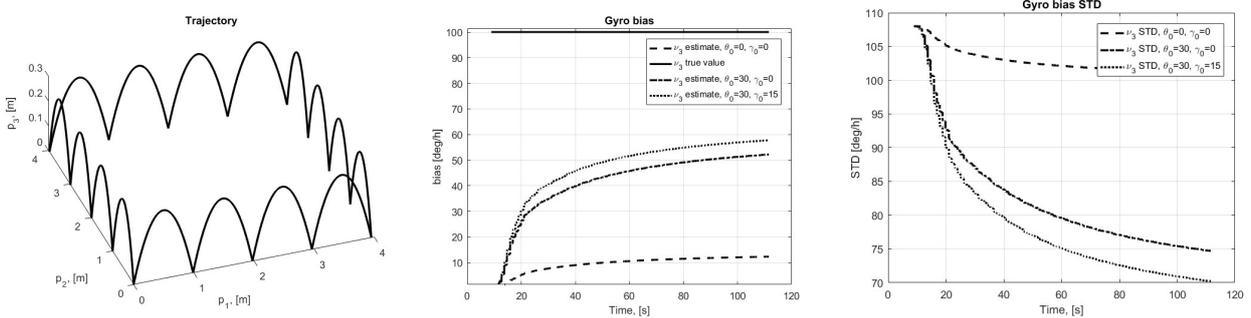


Рис.1. Слева – пример траектории стопы, по центру – результаты оценки дрейфа «вертикального» гироскопа при разных способах установки измерительного блока на стопу, справа – соответствующие оценкам ковариации.

Заключение. Показано, что в случае использования упрощенных уравнений движения дрейфы гироскопов наблюдаются, но не оцениваются за малое время. Выводы сделаны на основе имитационного моделирования. Отличия реальных данных от имитационных лишь ухудшают условия оценивания, поэтому необходимы дополнительные исследования влияния неучтенных в имитации факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Nilsson J. O., Skog I., Handel P.** A note on the limitations of ZUPTs and the implications on sensor error modeling //2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 13-15th November 2012. – 2012.
2. **Wagner J. F., Kohl M., Gyorfı B.** Reevaluation of algorithmic basics for ZUPT-based pedestrian navigation //IEEE access. – 2022. – Vol. 10. – P. 118419-118437
3. **Zhu M., Wu Y., Luo S.** A pedestrian navigation system by low-cost dual foot-mounted IMUs and inter-foot ranging //2020 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS). – IEEE, 2020. – P. 1-20.
4. **Bolotin Y., Bragin A., Gartseev I.** Covariance error analysis for pedestrian dead reckoning with foot mounted imu // CEUR Workshop Proceedings. — 2019. — Vol.2498. — P. 243–250
5. **Saab S. S., Gunnarsson K. T.** Automatic alignment and calibration of an inertial navigation system //Proceedings of 1994 IEEE Position, Location and Navigation Symposium-PLANS'94. – IEEE, 1994. – P. 845-852
6. **Skog I. et al.** Zero-velocity detection—An algorithm evaluation //IEEE transactions on biomedical engineering. – 2010. – Vol. 57. – №. 11. – P. 2657-2666

A.V. Bragin, (Lomonosov Moscow State University, Moscow). **Gyroscope biases estimation using zero-velocity updates in pedestrian navigation**

Abstract. Pedestrian navigation system based on foot-mounted inertial measurement units is considered. The problem of gyroscope biases estimation with the help of zero-velocity updates in case of simplified motion equations usage is studied. Analytical observability analysis done with several assumptions shows that gyroscope biases are observable. However numerical analysis done for simulated data indicates that “vertical” gyroscope bias estimates convergence is slow which is unacceptable for practical applications. Further studies should uncover the reason for such behavior of formally observable variables.

С.П. АБЛЯСОВА

(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА В ОКРЕСТНОСТИ ПОЛЮСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАЗИГЕОГРАФИЧЕСКИХ КООРДИНАТ

Задача согласованного моделирования траекторных параметров движения объекта - координат, компонент вектора линейной скорости, углов ориентации корпуса объекта, «идеальных» показаний инерциальных датчиков - датчиков угловой скорости и акселерометров - при движении объекта над/под полюсом востребована в задаче тестирования бортовых алгоритмов навигации инерциальных навигационных систем (например, бескарданных - БИНС). Особенность такого моделирования заключается в том, что в соответствующих моделях нельзя использовать традиционные параметры, такие как долгота, угол курса, поскольку последние не определены в точках, лежащих на оси вращения Земли. Показано, что указанную задачу моделирования можно решить на основе использования квазигринвичской системы координат, квазигеографических (квазигеоцентрических) координат, квазиуглов ориентации вместо традиционных. Нулевой тест алгоритмов автономного инерциального счисления, когда траектория движения объекта пересекает ось вращения Земли подтверждает предложенное решение задачи.

Введение. Рассматривается задача моделирования траекторных параметров объекта и согласованной имитации показаний инерциальных датчиков в случае, когда траектория пересекает ось вращения Земли и, в частности, географический полюс, для определенности северный. Поскольку традиционные модели имитаторов движения объекта оперируют, как правило, с географическими координатами и угловым движением сопровождающего географического трехгранника, то в окрестности полюса соответствующие математические модели вырождаются и не применимы. Поэтому предлагается введение квазигринвичской системы координат и использование соответствующих квазигеографических координат, квазиуглов ориентации вместо традиционных. В докладе представлена методика моделирования, позволяющая сформировать траекторию движения и отвечающие ей идеальные, т.е. не содержащие ошибок, измерения инерциальных датчиков БИНС. На основе такого моделирования формируются наборы траекторных параметров, позволяющие тестировать бортовые вычислительные алгоритмы в полярных районах.

Квазигринвичская и квазигеографическая системы координат. При имитации траектории пролета объекта через полюс полагается, что пересечение полюса происходит вдоль меридиана с известным значением географической долготы λ_0 , а начальное значение географической широты φ_0 полагается достаточно близким к 90° . При переходе к квазиординатам и квазиординатным трехгранникам упомянутый меридиан объявляется плоскостью квазиэкватора. Как следствие, квазиширота на полюсе будет иметь нулевое значение.

Квазигринвичская система координат $O\eta^q$ вводится двумя последовательными поворотами гринвичской системы координат $O\eta$ вокруг оси $O\eta_2$ на угол $-\frac{\pi}{2}$ и вокруг нового положения первой оси на угол $-\frac{\pi}{2} + \lambda_0$. Плоскость квазиэкватора совпадает с плоскостью меридиана, проходящего через точки, у которых значение географической долготы одинаково и равно λ_0 .

Квазигеографическая система координат Ox^{0q} определяется последовательностью поворотов трехгранника $O\eta^q$ вокруг $O\eta^q_3$ на угол $\lambda^q + \frac{\pi}{2}$ и поворотом полученного трехгранника вокруг первой оси на угол $\frac{\pi}{2} - \varphi^{0q}$.

Моделирование траектории. Для моделирования траектории в квазиординатах воспользуемся кинематическими уравнениями движения модельной точки М:

¹ Научный руководитель: д.ф.-м.н., зав. лаб. Голован А.А.

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\varphi^{0q} &= \frac{V_N^q}{R}, \\ \frac{d}{dt}\lambda^q &= \frac{V_E^q}{R \cos \varphi^{0q}}, \\ \frac{d}{dt}R &= V_{UP}^q,\end{aligned}\tag{1}$$

где V_E^q, V_N^q, V_{UP}^q – компоненты линейной относительной скорости в проекциях на оси квазигеографической системы координат Ox^{0q} , R – модуль радиус-вектора.

Начальные условия на квазикоординаты имеют вид:

$$\begin{aligned}\varphi^{0q}(t_0) &= 0, \\ \lambda^q(t_0) &= \frac{\pi}{2} - \varphi^0(t_0), \\ R(t_0) &= a + h(t_0) - \frac{ae^2}{2} \sin^2 \varphi(t_0) (\cos^2 \varphi(t_0) - \frac{1}{4} \sin^2 \varphi(t_0)) + O(0,1m), \\ \psi^q(t_0) &= -\frac{\pi}{2},\end{aligned}\tag{2}$$

где $\varphi^0(t_0)$ и $\varphi(t_0)$ – значения геоцентрической и географической широт соответственно в начальный момент времени t_0 , $h(t_0)$ – географическая широта в момент времени t_0 . ψ^q – угол истинного квазипурса, т.е. угол между осью Mx_2^{0q} (направлением на квазисевер) и проекцией продольной оси объекта на плоскость $Mx_1^{0q}x_2^{0q}$, отсчитываемый по часовой стрелке от оси Mx_2^{0q} . На всем интервале моделирования траектории угол квазипурса $\psi^q(t_0) = -\frac{\pi}{2}$, что соответствует движению объекта по квазиэкватору в сторону убывания квазидолготы. Кинематические уравнения (1) интегрируются с начальными условиями (2). Полученная в квазигеографических координатах траектория используется для моделирования показаний инерциальных датчиков.

Моделирование показаний инерциальных датчиков. Перед моделированием показаний акселерометров определяется вектор абсолютной угловой скорости трехгранника Ms , жестко связанного с объектом. Этот этап ничем не отличается от уже известного способа моделирования ДУС в географических координатах [2].

Показания акселерометров вычисляются на основе уравнений движения модельной точки M в осях трехгранника Mx^{0q} (см. [1], [2]):

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}A_{x^{0q}\eta^q} &= \hat{\Omega}_{x^{0q}} A_{x^{0q}\eta^q}, \\ \frac{d}{dt}V_{x^{0q}} &= (\hat{\Omega}_{x^{0q}} + 2\hat{u}_{x^{0q}})V_{x^{0q}} + f_{x^{0q}} + g_{x^{0q}},\end{aligned}\tag{3}$$

где $A_{x^{0q}\eta^q}$ – матрица ориентации трехгранника Mx^{0q} относительно квазигринвичской системы координат $O\eta^q$, $f_{x^{0q}}$ – вектор внешней удельной силы, действующей на точку M – идеальное измерение блока акселерометров, $\hat{u}_{x^{0q}}$ – кососимметрическая матрица, соответствующая вектору угловой скорости вращения Земли в осях квазигеоцентрического трехгранника Mx^{0q} , $g_{x^{0q}}$ – вектор удельной силы тяжести, $\Omega_{x^{0q}}$ – вектор угловой скорости трехгранника Mx^{0q} .

Нулевой тест. На основе симитированных показаний инерциальных датчиков было осуществлено тестирование алгоритма автономного инерциального счисления БИНС, когда в качестве опорного навигационного трехгранника использовался географический трехгранник с законом относительно свободной ориентации в азимуте. Такой опорный трехгранник традиционно используется в авиации. Результаты нулевого теста алгоритма инерциального счисления показали практическое совпадение вычисленных траекторных параметров с исходными траекторными параметрами, лежащими в основе моделирования.

Заключение. Показано, что для моделирования траекторных параметров движения объекта, пересекающего точки лежащие над/под полюсом следует использовать квазиординаты и квазиуглы ориентации. Такой прием позволяет осуществлять последующее полноценное тестирование бортовых алгоритмов инерциального счисления на траекториях такого типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А. *Математические основы инерциальных навигационных систем*. – М.: Издательство Московского университета, 2020, – 160 с.
2. Богданов О.Н. *Методика согласованного моделирования измерений инерциальных датчиков, траекторных параметров объекта с приложением к задачам инерциальной и спутниковой навигации*. Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук. 2015
3. Лукьянов Д.П., Мочалов А.В., Одинцов А.А., Вайсгант И.Б. *Инерциальные навигационные системы морских объектов*. Ленинград : Судостроение, 1989, 184 с.

S. P. Abyasova (Lomonosov Moscow State University, Moscow). **Simulation of trajectory parameters of object motion in pole areas using quasi-geodetic coordinates**

Abstract. The task of agreed on simulation of an object's trajectory parameters - coordinates, components of the linear velocity, attitude angles, "ideal" readings of inertial sensors - angular rate sensors and accelerometers - when the object moves above/below the pole is in demand in the task of testing on-board navigation algorithms of inertial navigation systems (for example, strapdown - INS).

The peculiarity of the mentioned simulation problem is that traditional parameters that are longitude and heading cannot be used in the relevant models, since the latter are not defined at points lying on the axis of Earth rotation.

It is proved that this simulation can be done by using a quasi-Greenwich coordinate system, quasi-geographic (quasi-geocentric) coordinates, and quasi-angles of orientation instead of traditional ones.

The zero test of inertial dead reckoning algorithms, when the trajectory of an object crosses the axis of Earth rotation, confirms the proposed solution to the problem.

Д. И. СМОЛЬЯНОВ

(Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва)

ЗАДАЧА НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНОЙ КОЛЕСНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ, СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ И ОДОМЕТРИИ

Доклад посвящен описанию разработки, тестирования и внедрения алгоритмов навигации для беспилотной колесной сельскохозяйственной техники, когда аппаратный состав ее навигационного комплекса состоит из низкоточной бесплатформенной инерциальной навигационной системы, приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем и данных одометрии — одометра и датчиков поворота руля или рамы.

Введение. В задачах функционирования беспилотной сельскохозяйственной техники важнейшая роль отведена задаче навигации. Для обработки большинства культур требуется надежное позиционное решение с точностью до нескольких сантиметров. Высокая точность важна также для снижения затрат топлива и обеспечения безопасной для человека работы сельскохозяйственной техники. Надежность навигационного решения заключается в устойчивости решения к выбросам и кратковременным пропадающим информации ГНСС.

Навигационный комплекс системы беспилотного управления включает бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС), построенную на микроэлектромеханических сенсорах (МЭМС), одного приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), а также одометр и датчик углового положения колеса или полурам (ДУП). Совместные данные одометра и ДУП называются одометрией.

В докладе рассматриваются два подхода к интеграции с одометрией: слабосвязанный и тесносвязанный. Известны подходы к слабо- и тесносвязанной интеграцией с одометром [1, 2]. Данный доклад расширяет эти подходы за счет добавления нового источника информации – ДУП. Показывается эквивалентность данных подходов с точки зрения оценок постоянных ошибок одометрии.

Также в докладе рассматривается способ скоростной коррекции БИНС, основанный на свойствах кинематической модели объектов навигации – т.н. покомпонентная ZUPТ коррекция. Такая коррекция не требует дополнительных по отношению к БИНС источников навигационной информации, а опирается на характер движения наземного транспортного средства. При помощи ковариационного анализа показана наблюдаемость смещений нулей акселерометров при такой коррекции.

Кинематические модели. В докладе рассматриваются две самых распространенных модели компоновки сельскохозяйственной техники: классическая и шарнирно-сочлененная. Техника с классической компоновкой имеет четыре колеса, два из которых являются поворотными. Как правило тракторы имеют поворотные колеса на передней оси, а комбайны на задней. Для аппроксимации классической техники используется велосипедная кинематическая модель [3, 4]. Шарнирно-сочлененная техника имеет две полурамы, по два колеса на каждой. Поворот в этом случае реализуется за счет изменения угла между полурамами. Для аппроксимации такой техники используется шарнирно-сочлененная кинематическая модель [5, 6].

Кинематические уравнения этих моделей используются для построения одометрического счисления в слабосвязанной интеграции с одометрией и для построения корректирующих измерений в тесносвязанной интеграции с одометрией, которые мы обсудим дальше.

Задача оценивания. Использован традиционный подход к решению задачи инерциальной навигации, когда при помощи показаний инерциальных датчиков реализуются алгоритмы счисления БИНС в осях опорного географического трехгранника с тем или иным способом устойчивого моделирования вертикального канала БИНС. Если имеются данные ГНСС, решается задача коррекции БИНС при помощи данных ГНСС. Задача коррекции решается с применением обратных связей (замкнутый вариант) по оценкам соответствующего фильтра Калмана.

¹ Научный руководитель д.ф.-м.н., профессор, зав. лаб. Голован А.А.

Методически задача коррекции сводится к решению задачи оценивания (для иллюстрации в непрерывном времени) вида

$$\dot{y} = Ay + q, z = Hy + r, \quad (1)$$

где y – вектор состояния, A – матрица, соответствующая принятой модели линейных уравнений ошибок БИНС и линейных моделей инструментальных погрешностей одометра и угла поворота колес/рамы, q, r – векторные случайные процессы типа белого шума заданной интенсивности, z – вектор измерения, формируемый при помощи данных ГНСС и одометра, H – соответствующая матрица измерений.

Слабосвязанная интеграция с одометрией. Концепция слабосвязанной интеграции БИНС с одометрией подразумевает два параллельно работающих счисления: инерциальное и одометрическое, как и две задачи оценивания. Одна задача оценивания была описана в [1] с вектором состояния

$$y_1 = (\Delta x^T, \delta V^T, \alpha_1, \alpha_2, \beta_3, k^v, \mathcal{N}_1^*, \mathcal{N}_3^*, v_0^T, \Delta f_0^T)^T \quad (2)$$

где Δx – вектор позиционных ошибок БИНС, δV – вектор динамических скоростных ошибок БИНС, α_1, α_2 – угловые ошибки построения приборной вертикали, β_3 – азимутальная угловая ошибка, k^v – масштабный коэффициент одометра, $\mathcal{N}_1^*, \mathcal{N}_3^*$ – параметры несоосности «измерительной» оси одометра с осями БИНС, v_0 – вектор дрейфов датчиков угловых скоростей (ДУС), Δf_0 – вектор смещения нулевых сигналов акселерометров.

Вектор состояния другой задачи оценивания имеет вид

$$y_2 = (\Delta x_1^*, \Delta x_2^*, \Delta \psi, k^{v*}, k_0^\delta, k_1^\delta)^T, \quad (3)$$

где k_0^δ, k_1^δ – смещение нулевого сигнала и масштабный коэффициент ДУП соответственно.

Два приведенных вектора состояния имеют общие компоненты, но значения оценок этих компонент могут различаться, для демонстрации этого факта используется индекс (*).

Динамические уравнения для y_1 основаны на традиционных уравнениях ошибок БИНС [7]. Динамические уравнения для y_2 основаны на линеаризованных уравнениях ошибок одометрического счисления.

Слабосвязанный подход можно назвать традиционным, объединяющим в себе два традиционных подхода к навигации наземной техники — инерциального и одометрического. Преимуществом данного подхода можно назвать независимую работоспособность двух параллельных задач оценивания, что повышает надежность в случае отказа одной из компонент.

Тесносвязанная интеграция с одометрией. Тесносвязанный подход подразумевает одно счисление — инерциальное. Задача оценивания также одна, но с расширенным вектором состояния

$$y = (\Delta x^T, \delta V^T, \alpha_1, \alpha_2, \beta_3, k^v, \mathcal{N}_1^*, \mathcal{N}_3^*, k_0^\delta, k_1^\delta, v_0^T, \Delta f_0^T)^T, \quad (4)$$

Данные одометрии в этом подходе участвуют в качестве корректирующих измерений.

Преимуществом изложенного подхода является отсутствие дополнительных вычислительных расходов, вызванных избыточностью задач оценивания из слабосвязанного подхода.

Покомпонентная ZUPT коррекция. Здесь под покомпонентной ZUPT (Zero Velocity Update Technology) будем понимать коррекцию по нулевым компонентам скорости курсовой точки, то есть точки, скорость которой направлена вдоль продольной оси техники. Такой метод позволяет проводить коррекцию даже в случае отсутствия показаний одометра, и, кроме того, не требует стоянки, как классическая ZUPT коррекция.

В основе этого подхода лежит свойство колесной техники, которое можно описать в виде неголономной связи

$$\dot{x}_1 \cos \psi - \dot{x}_2 \sin \psi = 0, \quad (5)$$

Где x_1, x_2 – горизонтальные координаты, ψ – угол курса.

Заключение. В докладе рассмотрены два подхода к интеграции с одометрией: тесно связанный и слабо связанный. Рассматриваются две модели компоновки сельскохозяйственной техники: классическая и шарнирно-сочлененная. Показывается эквивалентность данных подходов с точки зрения оценок постоянных ошибок одометрии. Кроме того, рассматривается способ коррекции, основанный на кинематических моделях техники и не требующий дополнительных по отношению к БИНС источников навигационной информации. С помощью ковариационного анализа показывается наблюдаемость смещений нулевых сигналов акселерометров. Все изложенные подходы реализованы и протестированы на разных моделях сельскохозяйственной техники в условиях реальной эксплуатации.

Работа проводилась при поддержке компании Cognitive Pilot.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Голован А.А., Никитин И. В.** Задачи интеграции БИНС и одометра с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Часть 1. М.: Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1, Математика. Механика. 2015. № 2. С. 69-72.
2. **Голован А.А.** Интеграционное решение «БИНС–одометр»: позиционный вариант // Гироскопия и навигация. Том 29. №2 (113), 2021. С. 110-125. DOI:10.17285/0869-7035.0066
3. **Polack, Philip & Alché, Florent & Novel, Brigitte & de La Fortelle, Arnaud.** The kinematic bicycle model: A consistent model for planning feasible trajectories for autonomous vehicles?. 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). PP. 812-818, 2017. DOI:10.1109/IVS.2017.7995816.
4. **Min, Haigen & Wu, & Cheng, & Zhao.** Kinematic and Dynamic Vehicle Model-Assisted Global Positioning Method for Autonomous Vehicles with Low-Cost GPS/Camera/In-Vehicle Sensors. Sensors 19. 5430., 2019. DOI:10.3390/s19245430.
5. **Nayl T.** Modeling, Control and Path Planning for an Articulated Vehicle. Luleå tekniska universitet, Luleå, Sweden, 2013.
6. **Delrobaei M.** Design and Steering Control of a Center-Articulated Mobile Robot Module. Hindawi Publishing Corporation. Journal of Robotics. Volume 2011, Article ID 621879. DOI:10.1155/2011/621879
7. **Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А.** Математические основы инерциальных навигационных систем. М.: Издательство Московского университета. 2020

D.I. Smolyanov, A.A. Golovan (Lomonosov Moscow State University, Moscow). **On the navigation problem of unmanned wheeled agricultural machinery using inertial, satellites information and odometry.**

Abstract. The report describes the development, testing, and implementation of navigation algorithms for unmanned wheeled agricultural vehicles when the navigation equipment consists of a low-grade inertial navigation system, a receiver of global navigation satellite systems, and odometry data — odometer-derived velocity and a steering angle sensor.

УДК 539.184.5

ВЛАСОВА М.А., ЧАЛКОВ В.В.
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург)

РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ПРОВЕРКИ ОПТИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК КВАНТОВЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ЭТАЛОНА

Представлены результаты создания модульного стенда для проверки оптических ячеек, используемых в квантовых датчиках. Разработка стенда направлена на обеспечение высокой точности позиционирования и эффективного тестирования ячеек в условиях лабораторных исследований. Результаты тестирования демонстрируют эффективность предложенного подхода и его потенциал для дальнейших исследований в области квантовых технологий.

Введение. Квантовые датчики представляют как перспективные новые разработки [1 - 2], так и уже проверенные временем устройства [3 - 5], предназначенные для выполнения высокоточных измерений различных физических величин, таких как магнитное поле, угловая скорость, время и частота. Среди подобных устройств — квантовые магнитометры, атомные стандарты частоты и гироскопы, которые используют квантовые свойства атомов для достижения исключительной точности и стабильности. Хотя некоторые квантовые датчики до настоящего времени находятся на стадии разработки, их текущие характеристики уже демонстрируют значительные преимущества в своих специализированных применениях [6, 7]. Однако для ряда квантовых датчиков всё ещё требуются исследования. Основным элементом квантовых датчиков являются ячейки с рабочим веществом, в которых атомы взаимодействуют с электромагнитным излучением. Качество изготовления таких ячеек напрямую влияет на точность и стабильность измерений, что делает их проверку важным этапом разработки квантовых датчиков. В настоящее время технология производства ячеек и подбор газов, оптимальных для отдельных применений, остаются на экспериментальной стадии. Параметры ячеек могут значительно варьироваться от партии к партии, что требует тщательного контроля качества и оценки их характеристик. Одним из эффективных неразрушающих методов контроля качества изготовления и оценки характеристик ячеек является измерение ширины оптического резонанса [8, 9]. Применение классического оптического оборудования [10, 11] для проверки таких ячеек может быть дорогостоящим и затруднительным, особенно в условиях нестабильной или нестандартной геометрии ячеек.

Целью настоящей работы является разработка стенда для сравнительного анализа оптических ячеек с применением модульной конструкции. Предложенный стенд позволяет проводить неразрушающий контроль качества изготовления и заполнения ячеек, сравнивая эталонную и проверяемую ячейки [12]. Использование аддитивных технологий при создании стенда позволило применить концепцию модульного дизайна, тем самым обеспечить гибкость в адаптации стенда под различные типы ячеек. При необходимости проверки нестандартной ячейки можно быстро разработать и напечатать модуль, соответствующий её размерам и форме, обеспечивая ячейке независимый контроль температуры, что минимизирует затраты и время для подготовки к эксперименту не снижая стабильности измерений.

Спектроскопический анализ газонаполненных ячеек. Спектроскопический анализ линии поглощения щелочного металла является эффективным методом неразрушающего контроля параметров газовых ячеек [13], поскольку позволяет выявлять дефекты, возникающие при их заполнении, такие как отсутствие буферного газа, его недостаточное количество или нарушения целостности ячейки, при этом оставляя ячейку пригодной для использования [14]. В настоящем исследовании для проверки ячейки используется лазер с длиной волны 895 нм, соответствующей оптическому переходу в атомах цезия 133. При взаимодействии света с атомами цезия происходит резонансное поглощение излучения, связанное с переходами между сверхтонкими уровнями [15-17].

¹Научный руководитель: к.т.н., начальник лаборатории Безмен Г.В.

Энергетические переходы в атомах цезия ^{131}Cs имеют сверхтонкое расщепление величиной 9,2 ГГц для основного состояния и 1,2 ГГц для возбуждённого, что создаёт четыре четкие резонансные линии. Повышенное по сравнению с эталонной ячейкой давление буферного газа в тестируемой ячейке уменьшает время релаксации атомов цезия из-за соударений с атомами буферного газа, что, в свою очередь, приводит к уширению резонансной линии.

Оценка уширения резонансной линии относительно эталонной ячейки позволяет судить о качестве наполнения исследуемой ячейки. Использование эталонной ячейки дает возможность проводить такие измерения без привлечения дорогостоящих оптических спектроанализаторов

Описание стенда. Для описанного выше подхода был разработан стенд, включающий две оптические ячейки: одна служит эталоном, а другая — тестируемым образцом. Обе ячейки освещаются единым источником света, что обеспечивает идентичные условия для измерений. Световой поток разделяется с помощью светоделительного куба с коэффициентом 90/10, где 10% света направляется на эталонную ячейку, а оставшиеся 90% — на тестируемую. Такое разделение выбрано, поскольку форма каждой тестируемой ячейки может варьироваться, увеличивая световые потери.

Из-за предполагаемых различий в составе газов для достижения схожей концентрации щелочного металла ячейкам требуется разный температурный режим. Он достигается модульностью стенда: каждая из ячеек располагается в своём модуле, имеющем независимый контроль температуры, что позволяет установить необходимую температуру для каждой из ячеек. В качестве источника света применяются вертикально-излучающий лазер (VCSEL-лазер L895VH1). Длиной волны излучения такого лазера можно управлять как изменением температуры, так и тока. Для упрощения задания длины волны излучения лазером, он так же располагается в модуле с независимым контролем температуры, что позволяет изменять длину волны, варьируя только силу инжекционного тока.

Следует отметить, что источники света семейства VCSEL обладают низкой мощностью и концентрацией светового пучка по сравнению с излучателями с внешним резонатором, что накладывает ограничения на точность позиционирования ячеек, лазерного куба и фотоприемника на одной оптической оси, с допустимым отклонением не более 0.5 мм.

За каждой оптической ячейкой установлен фотоприемник (PD), который регистрирует интенсивность прошедшего света. Сигналы, полученные с фотоприемников, передаются на устройство анализа данных. Схематическое изображение стенда представлено на рисунке 1.

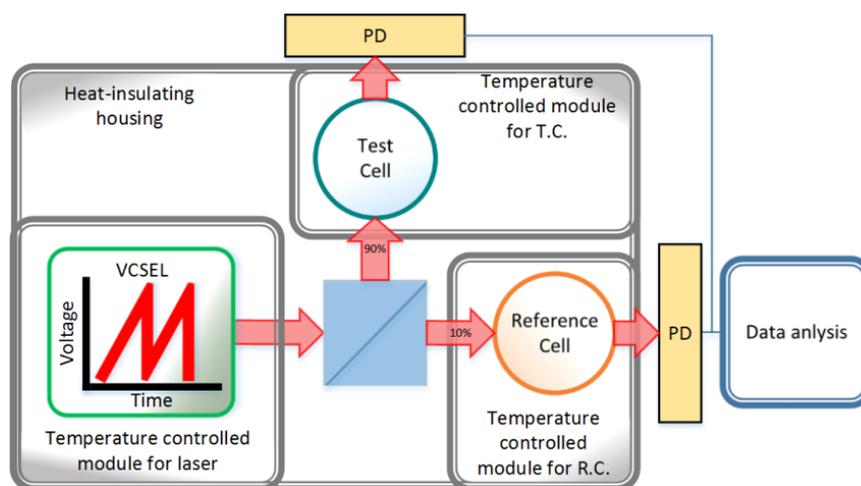


Рис. 1. Схематическое изображение стенда для проверки оптических ячеек. R.C. – ячейка эталон; T.C. – тестируемая ячейка; VCSEL - вертикально-излучающий лазер; P.D. - фотодетектор

Поскольку концентрация щелочного металла в ячейке прямо зависит от её температуры, а длина волны излучения лазера подвержена температурным изменениям, для тестирования необходима надежная температурная защита от окружающей среды, а также легкий доступ ко всем элементам стенда. Поэтому в качестве материала для изготовления стенда был выбран материал с высокой теплоёмкостью. Конструкция стенда спроектирована с учётом возможно-

сти проверки ячеек различных форм без необходимости в дополнительной доработке всего стенда, для проверки нестандартных ячеек достаточно заменить модуль для тестируемой ячейки на подходящий. Для обеспечения такой функциональности предусмотрены отдельные модули, интегрированные в основной корпус стенда, в каждом из которых реализован независимый контроль температуры.

Ход эксперимента. На лазер, нагретый до рабочей температуры, подаётся инжекционный ток, изменяющийся по пилообразному закону в диапазоне 1.2 -1.4 вольта. По мере нагрева ячеек увеличивается концентрация паров щелочного металла, и когда достигается пик поглощения равный 60-100% от амплитуды сканирующего сигнала лазера для тестируемой ячейки и 160-190% для эталонной ячейки производится запись сигналов с фотоприёмников. Эти значения справедливы исключительно для проверенных ячеек и должны определяться экспериментально на основе насыщения цезия в ячейках, что отражает прекращение увеличения пика поглощения при расширении резонанса.

Зарегистрированные фотоприемниками сигналы, представляют собой зависимость интенсивности света, прошедшего через ячейку и взаимодействующего с веществом в ней, от тока инжекции лазера (от частоты излучения лазера). Пример таких сигналов представлен на рисунке 2. Эти сигналы используются для оценки характеристик проверяемых ячеек. В первую очередь, стенд позволяет определить ячейки, которые не были заполнены, что свидетельствует о браке при производстве. У ячеек, успешно заправленных необходимыми газами измеряется величина смещения пиков поглощения и полуширины резонансов в проверяемой ячейке относительно эталонной ячейки. Эти характеристики впоследствии применяются в качестве параметров при использовании ячеек.

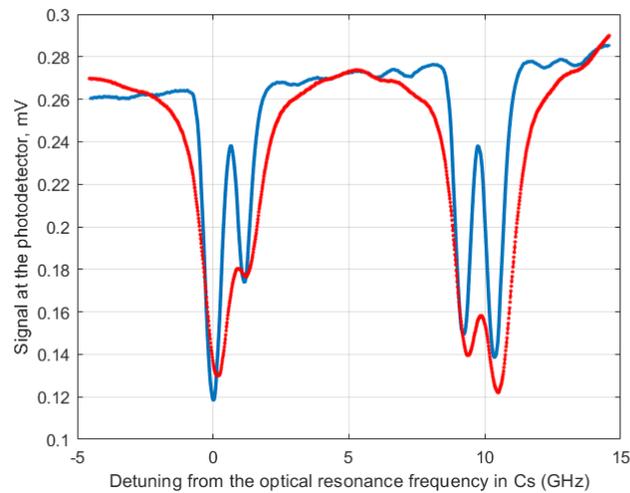


Рис. 2. Результаты тестирования ячеек: сплошная линия (solid) — сигнал, полученный при сканировании через эталонную ячейку; пунктирная линия (dashed) — сигнал, полученный от проверяемой ячейки.

Обработка сигналов, пример которых представлен на рисунке 2, производится с помощью аппроксимации четырьмя лоренцевскими контурами [18, 19] с учётом зависимости интенсивности света испускаемого лазером от инжекционного тока:

$$S(\nu) = V + K_p L(\nu - \nu_0) - K_p K_M \left(\frac{\Gamma_{2,1} A_1}{(\nu - \nu_1)^2 + \Gamma_1^2} + \frac{\Gamma_{2,2} A_2}{(\nu - \nu_2)^2 + \Gamma_2^2} + \frac{\Gamma_{2,3} A_3}{(\nu - \nu_3)^2 + \Gamma_3^2} + \frac{\Gamma_{2,4} A_4}{(\nu - \nu_4)^2 + \Gamma_4^2} \right) + V_{ns}$$

где ν - напряжение тока инжекции лазера; V - базовое напряжение тока инжекции лазера; K_p - коэффициент зависимости мощности от длины волны излучения лазера; L - коэффициент наклона сигнала; K_M - коэффициент преобразования тока инжекции лазера в частоту излучения лазера; ν_n - токи при которых достигаются соответствующие резонансы; $\Gamma_{2,n}$ - постоянные релаксации поперечной намагниченности; Γ_n - искомые полуширины соответствующих резонансов; A_n - амплитуды соответствующих резонансов; V_{ns} - шумовая составляющая, представляющая собой белый шум; $n = 1, 2, 3, 4$.

Преимущества применения аддитивных технологий. Точность позиционирования оптических элементов стенда с учётом описанных ограничений на допуски является сложной и высокотехнологичной задачей при использовании субтрактивных методов изготовления, особенно без дополнительной подгонки во время эксперимента. В этом контексте фотополимерная печать предоставляет необходимую точность, достигая значений в пределах 0.1 мм, что позволяет эффективно и быстро реализовать модульный дизайн стенда.

Выводы. В работе представлен модульный стенд для проверки оптических ячеек используемых в квантовых датчиках, который обеспечивает гибкость в настройке и быструю замену компонентов. Описан эксперимент по определению уширения линии резонанса в газонаполненной ячейке относительно эталонной ячейки. Отмечено, что благодаря модульному подходу, стенд поддерживает высокую, вплоть до 0.1 мм, точность позиционирования оптических элементов и остается экономичным вне зависимости от геометрии ячеек и упрощает настройку стенда к разным условиям экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №2 (109). С. 3-10. DOI 10.17285/0869-7035.0028
2. **Popov, E.N., Barantsev, K.A., and Litvinov, A.N.**, “Theoretical simulation of a signal for a scheme of an atomic spin gyroscope with optical detection”, *Kvantovaya Elektronika*, vol. 49, no. 2, 2019, pp. 169–177.
3. **Ding, M.** Development and prospect of quantum sensing technology // Материалы XX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием / Науч. Ред.: д.т.н. проф. О.А. Степанов / Под общ. ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГИЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. 443 с.
4. **Петров А.А.** - методы улучшения точностных характеристик квантовых стандартов частоты // Акционерное общество «Российский институт радионавигации и времени» // 2021
5. **Басов Н. Г., Беленов Э. М.**, Сверхузкие спектральные линии и квантовые стандарты частоты, «Природа», 1972, № 12.
6. **Basov N. G., Gubin M. A.** Quantum frequency standards // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2000. – Т. 6. – №. 6. – С. 857-868.
7. **Александров Е. Б. и др.** Градиентометрические исследования квантового магнитометра на парах цезия // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – №. 3. – С. 100-102.
8. **Nwaboh J. A. et al.** Optical Path Length Calibration: A Standard Approach for Use in Absorption Cell-Based IR-Spectrometric Gas Analysis // *International Journal of Spectroscopy*. – 2014. – Т. 2014. – №. 1. – С. 132607.
9. **Юльметова О. С. и др.** Анализ химических взаимодействий при заполнении цезием газовой ячейки квантового магнитометра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. №. 3. С. 438-447.
10. US20160349481A1. Monolithic optical mounting element. United States Patent and Trademark Office. Published on 2016-12-01
11. Thorlabs, Inc. (2024). Method of making a pre-aligned optical mount (U.S. Patent No. US11982861B2). U.S. Patent and Trademark Office
12. **Đujić M. et al.** Comparative analysis of light storage in antirelaxation-coated and buffer-gas-filled alkali vapor cells // *Scientific reports*. – 2024. – Т. 14. – №. 1. – С. 14467.
13. **Булгакова В. В. и др.** Экспериментальный стенд оптической накачки-терагерцового зондирования для исследования сверхбыстрой динамики носителей заряда в фотопроводящих средах. – Национальный исследовательский университет ИТМО конференция: невская фотоника-2023 Санкт-Петербург, 09–13 октября 2023 года Организаторы: Национальный исследовательский университет ИТМО.
14. **Шевченко А. Н., Кузьмин А. Г., Титов Ю. А.** Масс-спектрометрическое измерение состава газовых смесей в ячейках квантового датчика вращения // Научное приборостроение. – 2018. – Т. 28. – №. 2. – С. 62-68.
15. **Болдырев К. Н. и др.** Первое наблюдение антипересечений сверхтонких уровней в оптическом спектре // XIII международные чтения по квантовой оптике (IWQO-2019). – 2019. – С. 49-50.
16. **Саргсян А. Г. и др.** Исследование атомных переходов цезия в сильных магнитных полях с помощью ячейки с толщиной в половину длины волны света // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2013. – Т. 98. – №. 8. – С. 499-503.
17. **Александров Е. Б., Вершовский А. К., Пазгалев А. С.** Магнитометр на симметричной паре переходов в сверхтонкой структуре 87Rb // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76. – №. 7. – С. 103-107.
18. **Вершовский А. К., Дмитриев С. П., Пазгалев А. С.** Квантовый магнитометр с оптической накачкой, комбинирующий достоинства МХ-и МZ-устройств // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. №. 10. С. 90-97.
19. **Власова М. А. И др.** Особенности применения VCSEL-лазеров в установке по контролю параметров газовых ячеек квантовых датчиков. – 2022.

M.A. Vlasova, V.V. Chalkov (State Research Center Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg). **Development of a modular stand for testing quantum sensor optical cells based on a reference standard**

Abstract. The results of the creation of a modular stand for testing optical cells used in quantum sensors are presented. The development of the stand is aimed at ensuring high positioning accuracy and effective testing of the cells in laboratory research conditions. The testing results demonstrate the effectiveness of the proposed approach and its potential for further research in the field of quantum technologies

С.А. ФЕДОРОВ, Ф.С. КАПРАЛОВ
(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва)

СГЛАЖИВАЮЩИЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕСТАБИЛЬНОГО ДРЕЙФА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА В ДИНАМИЧЕСКОМ КАЛИБРОВОЧНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Рассматривается задача калибровки микромеханических инерциальных датчиков. Описывается использование сглаживающего фильтра в целях получения оценки нестабильной составляющей показаний гироскопов. Приводятся результаты обработки экспериментальных данных, а также сравнение оценок переменного дрейфа, полученных с помощью прямого метода осреднения показаний гироскопов в статических положениях, фильтра Калмана и сглаживающего фильтра в RTS форме.

Введение. Микроэлектромеханические инерциальные сенсоры (далее МЭМС) обладают многими достоинствами, такими как низкое энергопотребление, компактность и доступная цена. Однако в большинстве случаев, характеристики точности подобных датчиков являются довольно низкими, и для применения МЭМС датчиков в прикладных задачах требуется использовать более сложную модель смещения нулевого сигнала, чем постоянная величина. Это касается и калибровочных экспериментов. Целью калибровки является оценка параметров априорной модели систематических погрешностей датчиков. В 2005 г. Н.А. Парусниковым (МГУ им. М.В. Ломоносова) была предложена методика калибровки блоков инерциальных сенсоров в сборе, основанная на задаче оценивания вектора состояния линейной динамической системы с помощью фильтра Калмана [1]. Как и в других методиках, на качество оценки калибровочных параметров может влиять медленная случайная составляющая показаний гироскопов. В докладе рассматривается модификация упомянутой методики [1], заключающаяся в применении RTS сглаживателя [2], использующего в каждый момент времени весь массив измерений для оценивания вектора состояния. С его помощью предполагается получение более точных оценок нестабильной составляющей показаний гироскопов во времени.

Постановка задачи оценивания калибровочных параметров. Для инструментальных погрешностей акселерометров и гироскопов принимаются следующие априорные модели:

$$f' - f \equiv \Delta f = \Delta f^0 + \Gamma f + \Delta f^s, \quad \omega' - \omega \equiv v = v^0 + \Theta \omega + v^s \quad (1)$$

где f' – столбец показаний акселерометров, f – истинные компоненты измеряемой удельной силы, Δf^0 – сдвиг нуля акселерометров, Γ – матрица масштабных коэффициентов и перекосов осей чувствительности акселерометров, Δf^s – стохастическая составляющая погрешности акселерометров, ω' – столбец показаний гироскопов, ω – истинные компоненты абсолютной угловой скорости, v^0 – дрейф гироскопов, не зависящий от угловой скорости, Θ – матрица масштабных коэффициентов и перекосов осей чувствительности гироскопов и v^s – стохастическая составляющая погрешности гироскопов.

Вводится линейная динамическая система с вектором состояния x :

$$x = (\beta_{x^0}, v^0, \Delta f^0, \Gamma, \Theta) \in \mathbb{R}^{24} \\ \dot{\beta}_{x^0} = \hat{u}_{x^0} \beta_{x^0} + L^T v, \Delta \dot{f}^0 = q_{\Delta f}, \dot{v}^0 = q_{v^0}, \dot{\Gamma} = 0, \dot{\Theta} = 0 \quad (2)$$

Задача калибровки сводится к оценке вектора состояния x при помощи корректирующих измерений y :

$$y \equiv L'^T f' - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0 & g & 0 \\ -g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \beta_{x^0} + L^T \Delta f \quad (3)$$

где L – матрица ориентации приборного трехгранника, жестко связанного с осями чувствительности акселерометров, относительно географического трехгранника, ориентированного по сторонам света, L' – числовой образ L , полученный путем интегрирования кинематического урав-

¹ Научный руководитель: к.ф.-м.н., в.н.с. лаб. Козлов А.В.

нения Пуассона с использованием показаний гироскопов и некоторого начального значения $L'(0)$, β_{x^0} – вектор малого конечного поворота ошибки ориентации, g – эталонное значение удельной силы тяжести, $q_{\Delta f}$, q_{v^0} – белые шумы с априорно заданными интенсивностями.

Оценка вектора состояния системы может быть получена как с помощью стандартного фильтра Калмана в прямом времени [3], так и с помощью сглаживающего фильтра в RTS форме [2]. Преимущество сглаживателя в RTS форме заключается в отсутствии необходимости реализации фильтра Калмана в обратном времени.

Результаты обработки экспериментальных данных. Калибровочный эксперимент с использованием одноосного поворотного стенда был проведен для инерциального измерительного блока STMicroelectronics модели ISM330DHCX. Схема эксперимента заключалась в последовательном вращении блока вокруг горизонтальной оси стенда на углы кратные 90° с остановками в каждом угловом положении на 10 секунд. Подобная схема эксперимента позволяет напрямую оценить нестабильность дрейфов гироскопов, используя осредненные измерения в одинаковых статических положениях. На Рис. 1 приведен график с оценками дрейфа гироскопа различными методами. График показывает, что оценка, полученная RTS сглаживателем, более точно приближает медленную составляющую вариации дрейфа микромеханического гироскопа в сравнении с оценкой, полученной фильтром

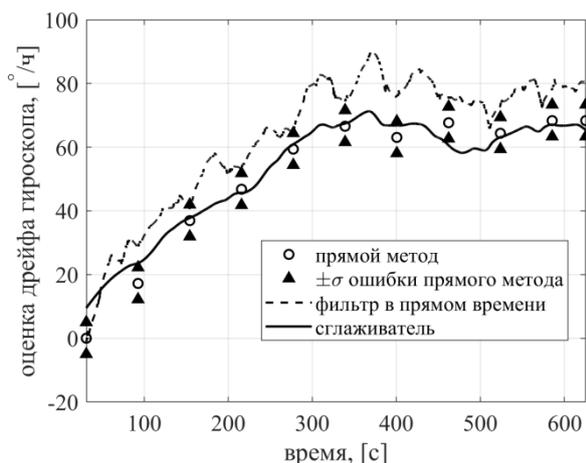


Рис. 1. Оценки нестабильного дрейфа гироскопа

Калмана. При этом для оценки дрейфа с помощью сглаживателя не требуется соблюдать специальную схему эксперимента, содержащую статические положения. По результатам проведенного моделирования сглаживающий фильтр дает положительные результаты и в случае вращений с постоянной угловой скоростью.

Заключение. В докладе была рассмотрена задача калибровки МЭМС датчиков с использованием сглаживающего фильтра в RTS форме для оценки низкочастотной нестабильной составляющей показаний гироскопов. Результаты обработки реальных и модельных экспериментальных данных показывают преимущество такого подхода перед использованием обычного фильтра Калмана и прямого метода оценки дрейфа с помощью осредненных показаний гироскопов в статических положениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парусников Н.А., Тихомиров В.В., Трубников С.А. Определение инструментальных погрешностей инерциальной навигационной системы на неподвижном основании – *Фундаментальная и прикладная математика*, том 11, номер 7., 159 – 166 с., 2005.
2. Dan Simon – *Optimal State Estimation: Kalman, ∞ , and Nonlinear Approaches*. P.286-294
3. Голован А.А., Парусников Н.А. *Математические основы навигационных систем: часть I.* – 2-е изд., испр. и доп. – М.: МАКС Пресс, 2012. – 172 с.

S.A. Fedorov (Lomonosov Moscow State University, Moscow). **Smoothing filter for micromechanical gyroscope unstable bias estimation in dynamic calibration experiment.**

Abstract. Smoothing filter in RTS form is applied to calibration problem for a 6-axis low-precision microelectromechanical inertial sensor to obtain more accurate estimates of unstable low-frequency stochastic gyroscope measurements component. Real experimental data processing indicates that estimates of the unstable gyroscope bias are close to those obtained with the direct method of averaging gyroscope measurements in static positions. The proposed method, however, does not require any static positions, thus simplifying the calibration experiment.

Д.А. САФИН

(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва)

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ БЕСКАРДАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И ОДОМЕТРА

В работе описывается алгоритм комплексной обработки первичной информации бескарданной инерциальной навигационной системы и одометра.

Алгоритм комплексной обработки информации корректирует параметры инерциального счисления и одометрического счисления, доставляет оценку инструментальных погрешностей инерциальных датчиков, параметров взаимного расположения системы БИНС-одометр и инструментальных погрешностей одометра при помощи фильтра Калмана.

Приводятся результаты обработки экспериментальных данных для различных наземных объектов – автомобиля, трактора, которые демонстрируют эффективность разработанного алгоритма.

Введение. Комплексирование информации бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС) и одометра находит широкое применение в различных приложениях – от дорожной диагностической лаборатории до беспилотных автомобилей и беспилотной сельскохозяйственной техники.

Источником первичной информации для решения задачи навигации наземных объектов служат показания инерциальных датчиков – акселерометров, датчиков угловой скорости (ДУС), входящих в состав БИНС и показания одометра, регистрирующего абсолютное значение приращения пройденного объектом пути. Рассматривается именно задача интеграции данных БИНС-одометр с целью выявления потенциальных точностных возможностей такой интеграции. При этом допускается использование иной возможно доступной навигационной информации, предоставляемой, например, приемником сигналов ГНСС.

В основе навигационного обеспечения лежат алгоритмы комплексной обработки информации, реализованные как для режима реального времени, так и для режима постобработки. В качестве алгоритма оценки используется фильтр Калмана.

При построении алгоритма решены следующие частные задачи:

1. начальная выставка БИНС в условиях неконтролируемых угловых движений корпуса БИНС
2. детектирование и учет в счислении заднего хода объекта, если одометр измеряет приращение пройденного пути без знака.
3. докалибровка системы БИНС-одометр по ее функционированию (по предыдущим заездам), а именно, юстировочных параметров: углов установки приборного трехгранника БИНС относительно «измерительной» оси одометра, погрешности масштабного коэффициента одометра.
4. учет в алгоритмах смещения приведенного центра БИНС и центра одометра.
5. применение алгоритма сглаживания в постобработке при известных координатах финальной точки остановки объекта с целью уточнения траекторных параметров движения от начала и до конца эксперимента.
6. тестирование режима Zero Velocity Update Technology коррекции (ZUPT-коррекции), при остановках объекта.

Особенности построения алгоритмов комплексной обработки информации

1. В БИНС применяется трехмерное автономное инерциальное счисление с демпфированием неустойчивого вертикального канала БИНС.
2. Осуществляется трехмерное одометрическое счисление координат с использованием показаний одометра и параметров ориентации от БИНС.
3. Полученные координаты используются для позиционной коррекции БИНС с демпфированием её вертикального канала.

¹ Научный руководитель: к.ф.м.н ведущий научный сотрудник Вавилова Н.Б.

Основные математические модели задачи коррекции БИНС при помощи измерений одометра:

1. трехмерные уравнения ошибок БИНС
2. трехмерные уравнения ошибок одометрического счисления
3. уравнения позиционной коррекции БИНС при помощи одометрического кинематического решения.

В вектор оцениваемых параметров включены:

1. ошибки инерциального и одометрического счисления
2. параметры модели инструментальных погрешностей инерциальных датчиков
3. погрешность масштабного коэффициента одометра
4. параметры взаимной геометрии одометра и БИНС:
 - взаимные перекосы системы БИНС—одометр по каналам курса и тангажа
 - смещения приведенных центров БИНС и одометра

Обработка экспериментальных данных, г. Москва. Заезды производились на одном автомобиле, на котором установлен БИНС навигационного класса точности.

Для коррекции использовались только позиционные измерения от одометра - результат одометрического счисления.

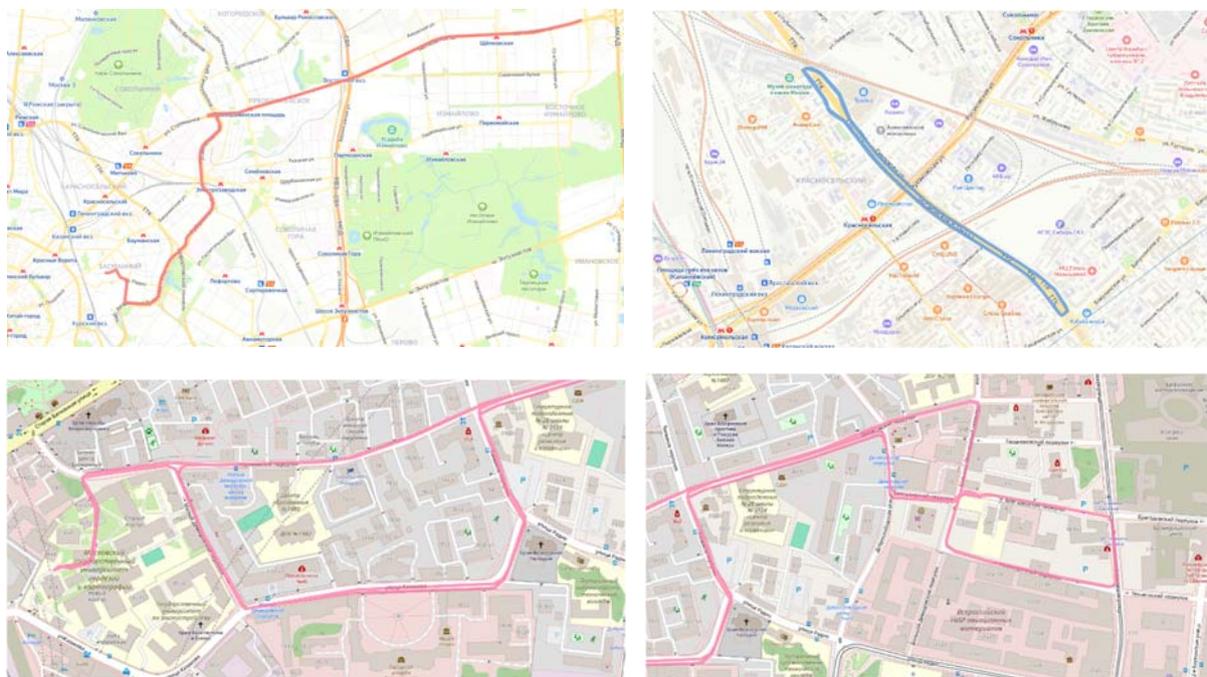


Рис. 1,2,3,4. Решения в реальном времени, наложенные на карту

В постобработке всех заездов были получены практически одинаковые оценки юстировочных параметров. Проверена эффективность компенсации юстировочных параметров (докалибровки системы БИНС-одометр) для улучшения точности навигации.

Испытания при использовании МЭМС датчиков. Для коррекции используется позиционная информация от одометра – результат одометрического счисления и позиционная информация от ГНСС. Алгоритм оценки используется в режиме введения обратных связей в инерциальное и одометрическое счисление.



Рис. 5. Решение в реальном времени, наложенное на карту



Рис. 6. Трактор, с установленным на нём МЭМС, одометром и ГНСС приёмником

В постообработке были получены оценки юстировочных параметров и вектора разнесения места крепления МЭМС и одометра, с высокой точностью близкие к заранее промеренным величинам.

Заключение. Результаты обработки экспериментальных данных показали работоспособность алгоритма интеграции БИНС-одометр и приемлемую точность в решении задачи навигации при использовании приборов различного класса точности. Показана эффективность докалибровки системы БИНС-одометр по функционированию для повышения точности навигационных определений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Изд-во Московского Университета, 2020.
2. Голован А.А., Никитин И.В. Задачи интеграции БИНС и одометра с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Часть 1, Часть 2. «Вестник московского университета. Математика. Механика.» №2, стр. 69-72, №4, стр. 68-72, Москва, 2015.
3. Голован А.А. Интеграционное решение «БИНС–одометр»: позиционный вариант // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. №2. С. 110–125. DOI 10.17285/0869-7035.0066.

D.A. Safin (Lomonosov Moscow State University, Moscow). **An algorithm for raw data fusion of a strapdown inertial navigation system and odometer**

Abstract. The paper describes an algorithm for raw data fusion of a strapdown inertial navigation system and odometer. The algorithm of data fusion corrects the parameters of inertial and odometry dead reckoning, provides estimates of instrumental errors of inertial sensors, lever arm parameters in the INS-odometer system, and instrumental errors of the odometer using a Kalman filter. The results of the experimental data processing for various types of land vehicles, such as cars and tractors, are presented. These results demonstrate the effectiveness of the developed algorithm.

В.Д. СМЕТАНИНА

(Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург)

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ КЛАСТЕРОВ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ С ПОМОЩЬЮ ЭНДЕМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В работе представлен подход к обнаружению кластеров в распределенных мультиагентных системах с использованием эндемической модели. Моделируя "активацию" агента как инфекционный процесс, демонстрируется, что паттерны совместной активации указывают на пространственную близость, без явной информации о расстоянии между агентами.

Введение. Современные системы отличаются растущей сложностью и размерностью, что делает централизованные стратегии управления ресурсоемкими в плане вычислительных и коммуникационных затрат. Это привело к увеличению интереса к распределенным мультиагентным системам, которые применяются в различных областях, таких как беспилотные транспортные средства, распределенные сенсорные сети, групповые роботы и летательные аппараты.

Сложность таких систем создает серьезные проблемы для традиционных методов управления, которые зачастую не способны эффективно управлять каждым агентом, а также не учитывают свойства системы на макроуровне [1]. Исследуя, как отдельные агенты на микроуровне спонтанно формируют согласованные структуры на мезоуровне, мы можем получить важные сведения для управления многомерными системами [2], [3]. Кроме того, многие из этих систем обладают свойствами самоорганизации и динамически формируют кластерные структуры. В этом смысле методы управления должны адаптироваться к таким динамическим структурам. В работе [4] описывается формирование мезоскопических структур на примере самолета с большим количеством «перьев», распределенных по поверхности, т.е. элементов с датчиками давления и поворотными устройствами. Было показано, что в условиях турбулентности, когда реакция системы нелинейна, коллективное движение агентов «перьев» способно привести к их самоорганизации и изменению режима обтекания корпуса самолета, тем самым образуя кластеры агентов на поверхности плоскости.

Кластерные стратегии управления показывают лучшие результаты по сравнению с подходами управления для макро и микроуровней. Так, в работе [5] была разработана адаптивная кластерная стратегия управления с обратной связью. Получение структуры кластеризации всей системы было основано на методе compressed sensing для компактного представления агрегированного состояния агента, т.е. на основе сжатых измерений. По сравнению с микромасштабными и макромасштабными подходами, кластерное управление превосходило эти стратегии с точки зрения времени конвергенции, эффективности и точности.

В предложенной работе рассматривается формирование кластеров на основе периодической активации агентов и последующего анализа динамики их распространения с использованием эндемической модели SIR (Susceptible, Infected Recovered). Подобно тому, как распространение инфекции в модели SIR демонстрирует возможные контакты в обществе [6], предполагается, что группы агентов, часто активирующихся вместе, находятся в пространственной близости друг к другу. Точно определяя кластеры, представляющие собой сплоченные группы взаимодействующих агентов, мы получаем более глубокое понимание внутренней организации системы и можем разрабатывать более эффективные стратегии управления. В отличие от статических подходов, модель SIR отражает временную эволюцию взаимодействий агентов через процесс "активации", что позволяет выявлять кластеры, которые возникают, распадаются и трансформируются со временем.

Предлагаемая работа посвящена выявлению кластеров в распределенной мультиагентной системе посредством периодической активации отдельных агентов.

Постановка задачи. Рассматривается система из N агентов. Каждый агент обладает состоянием $x_i[t] \in R^d$, которое может выступать в качестве его местоположения на координатной плоскости (следовательно, $d = 2$) или в многомерном координатном пространстве. Агенты помещены в ограниченную область и которым поручено достичь определенной целевой точки x^* .

Цель состоит в том, чтобы проанализировать пространственно-временные закономерности активных агентов с течением времени и сделать вывод о лежащем в их основе пространственном распределении. Таким образом определить группы агентов, которые часто активируются вместе, что будет указывать на их тесную близость.

Условия решения задачи. Для решения задачи предполагается, что агенты могут взаимодействовать в соответствии с графом связи. Взаимодействия агентов описываются через матрицу смежности $A = [a_{ij}]$, где означает $a_{ij} \neq 0$ наличие связи между агентами i и j , а $a_{ij} = 0$ ее отсутствие. Динамика изменения состояний агентов описывается следующим образом: с дискретными временными интервалами $t = 0, 1, 2, \dots$ для "вызова" случайным образом выбирается подмножество агентов. Пусть $C_t \subseteq \{1, 2, \dots, N\}$ - набор агентов, вызываемых в момент времени t . Выбор C_t осуществляется путем равномерной выборки с фиксированной вероятностью. Когда агент i вызывается в момент времени t (т.е. $i \in C_t$), его "ближайшие соседи" становятся "активными". Функция $N(i, r)$, которая возвращает набор агентов в радиусе r от агента i описывается:

$$N(i, r) = \{j \in \{1, 2, \dots, n\}: \|p_i - p_j\| \leq r\}, \quad (1)$$

где p – координаты местоположения.

Распространение активации описывается динамической моделью SIR (упрощенный вид):

$$\dot{G} = F(G) = \begin{cases} \dot{S} = S(A - S) - \beta_\gamma(t)IS \\ \dot{I} = \beta_\gamma IS - \frac{rI}{a + I} \end{cases}, \quad (2)$$

где $\beta_\gamma = \beta_0(1 + \Phi(\omega t))$, $G(t) = (S(t), I(t))$, A – коэффициент переносимости у восприимчивых агентов при отсутствии активации, γ – амплитуда периодических колебаний, $\omega > 0$ частота, β_0 скорость передачи активации при отсутствии периодичности, a – коэффициент задержки при восстановлении.

Заключение. В результате исследования была разработана среда моделирования для визуализации возникающих пространственных структур. Анализ закономерностей активации возбудителя с течением времени, показанный на Рис.1, выявляет отчетливые временные всплески. Эти всплески точно соответствуют моментам, когда в процессе "активации", имитирующем распространение инфекции в модели SIR, выделяются агенты, географически сгруппированные вместе. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку прогностических моделей для прогнозирования моделей активации и поведения системы, что позволило бы точнее выявлять кластеры, и соответственно, управление.

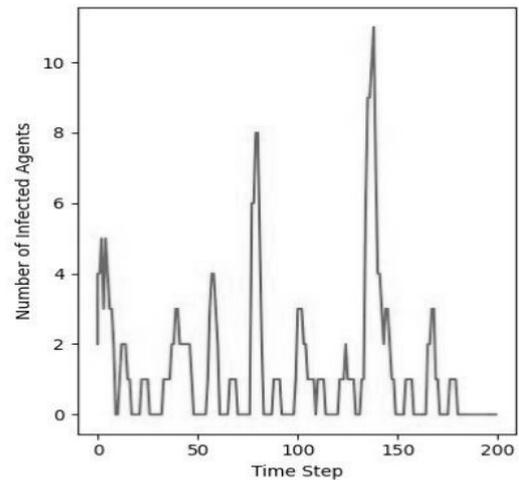


Рис.1. Количество "активных" агентов с течением времени

ЛИТЕРАТУРА

1. **H. Li, Y. Li, H. V. Zhao**, "Modeling Decision Process in Multi-Agent Systems: A Graphical Markov Game based Approach, APSIPA ASC, 2020, pp. 197-204.
2. **Amelin K., Granichin O.**, et al, A new method of adaptive mesoscale control in complex multiagent networked dynamical systems. Cybernetics and Physics, 2022. Vol. 11, Number 4. PP. 175-189.
3. **Cristin, J.** et al. Spatiotemporal organization of ant foraging from a complex systems perspective. Sci. Reports, 2024, Vol. 14, 12801.
4. **Granichin O., Khantuleva T., Amelina N.** Adaptation of aircraft's wings elements in turbulent flows by local voting protocol. IFAC-PapersOnLine 50, 2017, 1904–1909.
5. **Erofeeva V., Ershov V., Granichin O., Pankov V., Uzhva D., Granichina O.** Adaptive distributed cluster flow control for a group of autonomous robots, IFAC-PapersOnLine, Vol. 56, Issue 2, 2023, pp.8690-8695.
6. **Maurício de Carvalho J., Rodrigues A.**, Strange attractors in a dynamical system inspired by a seasonally forced SIR model, Physica D: Nonlinear Phenomena, 2022, Vol. 434, 133268.

V.D. Smetanina (Saint Petersburg State University, Saint Petersburg)

Identification of spatiotemporal clusters in multi-agent systems using an endemic model.

Abstract: The paper presents an approach to cluster detection in distributed multi-agent systems using an endemic model. By modeling the "activation" of an agent as an infectious process, the study demonstrates that patterns of joint activation indicate spatial proximity, without requiring explicit information about the distance between agents.

Д.Р. МИНГАЗОВ, М.С. КОЗИН¹

(Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНСЕНСУСА И УПРАВЛЕНИЯ С ФИКСИРОВАННЫМ ВРЕМЕНЕМ ДЛЯ СИСТЕМ С МНОЖЕСТВОМ АГЕНТОВ

В работе рассматриваются алгоритмы консенсуса и управления с фиксированным временем для многокомпонентных систем. Исследуются математические модели с использованием методов итеративного консенсуса и управления, а также предложен подход на основе фиксированного времени с нелинейными функциями. Приводятся результаты численных экспериментов, демонстрирующие эффективность предложенных методов.

Введение. Современные мультиагентные системы (МАС) являются важной областью исследований, особенно в контексте их применения в робототехнике, управлении беспилотными транспортными средствами и сетями связи. Задача координации агентов, каждый из которых имеет локальные правила поведения и взаимодействует с соседями, представляет собой актуальную проблему. Одним из ключевых вопросов является достижение согласованного состояния (консенсуса) всеми агентами в системе, несмотря на ограниченные вычислительные ресурсы и наличие ограничений по времени.

Традиционные методы консенсуса, такие как линейные модели обмена информацией между агентами, были предложены в работах Olfati-Saber et al. [3]. Эти методы обеспечивают асимптотическую сходимость к общему состоянию, что делает их полезными для различных практических приложений. Однако существенным недостатком этих алгоритмов является необходимость неограниченного времени для достижения консенсуса. Это ограничение снижает их эффективность в системах, требующих сходимости за конечное время.

Для решения данной проблемы были предложены методы управления с фиксированным временем (Fixed-Time Convergence, FTC), которые обеспечивают сходимость системы за конечный временной интервал, независимо от начальных условий агентов. Данный подход базируется на нелинейных функциях управления и был подробно рассмотрен в работах Полякова и Парсегова [4]. Эти методы гарантируют быстрое согласование состояний агентов и позволяют достигать консенсуса за фиксированное время, что делает их привлекательными для задач, где важна скорость реагирования системы.

В предложенной работе исследуются комбинированные методы консенсуса и FTC для систем с множеством агентов. В частности, рассматривается алгоритм, использующий нелинейные функции управления для ускорения сходимости. Выражение управления записывается в виде:

$$U_t = K_1(\sqrt[3]{|x_i - x_j|}) + K_2(x_i - x_j)^3 \quad (1)$$

где: x_i и x_j - состояния агентов, а K_1 и K_2 - константы, регулирующие скорость сходимости. Применение таких функций управления позволяет достичь консенсуса быстрее и за конечное время в сравнении с классическими подходами.

Предлагаемый доклад посвящен исследованию эффективности комбинированных методов консенсуса и управления с фиксированным временем для мультиагентных систем. Рассматриваются численные эксперименты, которые демонстрируют преимущество предложенного подхода в задачах управления системами с ограниченными временными ресурсами.

Постановка задачи. Рассматривается система с N агентами, каждый из которых обладает состоянием $x_i(t)$ на момент времени t , где $i = 1, 2, \dots, N$. Целью является разработка алгоритма, обеспечивающего достижение консенсуса всех агентов за фиксированное время. Это предполагает, что существует момент времени T , после которого состояния всех агентов совпадают:

¹ Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор кафедры Граничин О.Н.

$$x_i(T) = x_j(T) \quad \forall i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (2)$$

Задача заключается в построении такого алгоритма управления, который обеспечит согласование состояний всех агентов за конечное время T , независимо от их начальных условий.

Условия решения задачи. Для решения задачи предполагается, что агенты могут взаимодействовать с ограниченным числом соседей в соответствии с графом связи. Взаимодействия агентов описываются через матрицу смежности $A = [a_{ij}]$, где $a_{ij} \neq 0$ означает наличие связи между агентами i и j , а $a_{ij} = 0$ — ее отсутствие. Динамика изменения состояний агентов описывается следующим образом:

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \sum_{j \neq i} a_{ij} [K_1 (\sqrt[3]{|x_j^{(t)} - x_i^{(t)}|}) + K_2 (x_j^{(t)} - x_i^{(t)})^3] \quad (3)$$

где: K_1 и K_2 — положительные константы, регулирующие скорость сходимости. Данная нелинейная функция управления включает в себя два компонента: первый компонент с кубическим корнем отвечает за "мягкое" приближение состояний агентов, а второй — за ускорение процесса консенсуса за счет кубической разницы состояний.

Анализ устойчивости. Для анализа устойчивости системы рассмотрим функцию Ляпунова $V(t)$, определяемую как:

$$V(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} (x_j(t) - x_i(t))^2 \quad (4)$$

Эта функция характеризует расхождение состояний агентов и должна убывать по времени для гарантии сходимости. Производная функции Ляпунова по времени вычисляется как:

$$\dot{V}(t) = -K_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} (\sqrt[3]{|x_i - x_j|})^2 - K_2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} (x_j(t) - x_i(t))^6 \quad (5)$$

Оба члена убывающие, что подтверждает устойчивость предложенного алгоритма и гарантию сходимости всех агентов к одному состоянию за конечное время T .

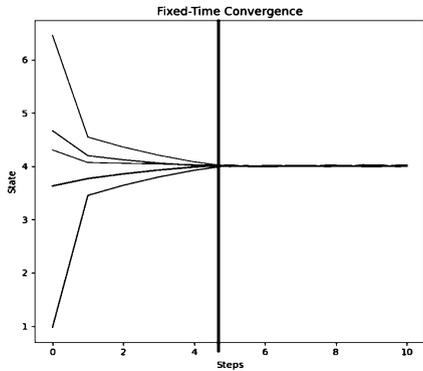


Рис. 1. Увеличение скорости сходимости для 5 агентов

Заключение. В результате исследования были проанализированы различные динамические модели для управления мультиагентными системами: протокол консенсуса, алгоритм Round-Robin и модифицированный протокол с элементами Fixed-Time Convergence (FTC). Было выявлено, что FTC значительно ускоряет процесс сходимости системы за счет возможности настройки параметров K_1 и K_2 , что позволяет гибко

управлять временем достижения консенсуса.

Оптимизация параметров K_1 и K_2 показала, что FTC превосходит традиционные методы по скорости сходимости. Дальнейшие исследования могут быть направлены на более глубокую оптимизацию этих параметров с использованием адаптивных методов или машинного обучения. Кроме того, важно изучить FTC в условиях частично связанных сетей агентов и с учетом ограничений по ресурсам.

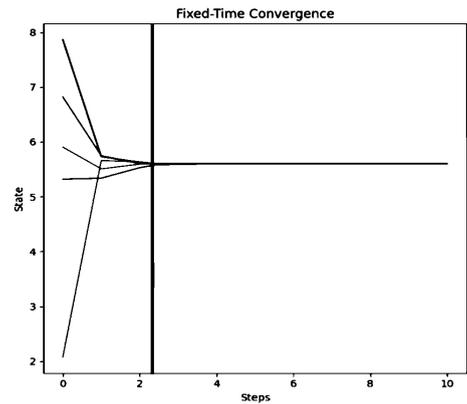


Рис. 2. Увеличение скорости сходимости для 5 агентов

Таким образом, работа демонстрирует эффективность FTC-алгоритмов для ускоренного консенсуса, а дальнейшие исследования позволят расширить их применение на более сложные задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Амелина Н.О., Граничин О.Н., Фрадков А.Л.** Метод усредненных моделей для дискретных адаптивных систем. М.: Автомат. и телемех., 2019. № 10, 3-36
2. **Амелина Н.О., Фрадков А.Л.** Приближенный консенсус в стохастической динамической сети с неполной информацией и задержками в измерениях. М.: Автомат. и телемех., 2012, № 11, 6–29
3. **Olfati-Saber R., Fax A., Murray R.M.**, Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems, Proceedings of the IEEE, 2007, Vol. 95, No. 1
4. **Parsegov S.E., Polyakov A.E., Shcherbakov P.S.**, Fixed-time Consensus Algorithm for Multi-agent Systems with Integrator Dynamics, IFAC Proceedings Volumes, 2013, Vol. 46, No. 27, P. 110-115
5. **Chen Y., Wang F., Wang B.**, Fixed-Time Convergence in Continuous-Time Optimization: A Fractional Approach, IEEE Control Systems Letters, 2022, Vol. 7, P. 631-636
6. **Ge P., Li P., Chen B., Teng F.**, Fixed-Time Convergent Distributed Observer Design of Linear Systems: A Kernel-Based Approach., IEEE Transactions on Automatic Control, 2023, Vol. 68, P. 4932-4939

D.R. Mingazov (Saint Petersburg State University. St. Petersburg)

Research on consensus methods and fixed-time control for multi-agent systems

Abstract: The paper examines consensus algorithms and fixed-time control methods for multi-component systems. Mathematical models are explored using iterative consensus and control techniques, and a fixed-time approach based on nonlinear functions is proposed. Numerical experiments are presented, demonstrating the effectiveness of the proposed methods.

Д.О. ГАВРИЛОВ, А.В. ИВЛИЕВ
(Самарский национальный исследовательский университет, Самара)

РАЗРАБОТКА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ НАНОСПУТНИКА

Вопрос ориентации спутников является важным для малоразмерных космических аппаратов. В данной работе разрабатывается магнитное исполнительное устройство системы ориентации, которое обладает конкурентоспособной эффективностью по сравнению с представленными на рынке образцами, за счет меньшего энергопотребления и компактных размеров.

Введение. Для проведения большинства исследований и экспериментов в космосе требуется определённая ориентация космического аппарата. Магнитные исполнительные органы (МИО) набирают всё большее распространение в применении в задачах ориентации малых космических аппаратов, количество запусков которых увеличивается. Этому способствуют доступная элементная база данных устройств, малая стоимость и высокая надёжность [1]. Стоит отметить, что магнитные системы активной стабилизации без сердечника требуют большого энергопотребления для создания необходимого управляющего момента. Предлагаемый доклад посвящен разработке исполнительного устройства магнитной системы ориентации с сердечником, обладающего высокой эффективностью при малом энергопотреблении.

Цель работы: разработка исполнительного устройства магнитной системы ориентации наноспутников, которое бы создавало наибольший магнитный момент при минимальном энергопотреблении и обеспечивало эффективность на уровне лучших современных образцов.

Стержень магнитной катушки было решено выполнить из магнитомягкого металла пермаллой марки 79НМ, так как он обладает наибольшей относительной магнитной проницаемостью из доступных материалов [2]. Общий вид экспериментальной установки представлен на фотографии, рис. 1.



Рис. 1. Экспериментальная установка

В ходе работы был проведен теоретический расчёт, разработка конструкции и изготовление исполнительного устройства, а также экспериментальное определение достигнутых параметров исполнительного устройства магнитной ориентации.

Для проведения эксперимента на катушку подавался ток 0,2А (напряжение 1,8 В), а также ток 0,38А (напряжение 3,3 В), обусловленные ограничением максимально допустимого тока системы питания спутника SamSat.

Экспериментальные данные, представленные в таблицах 1 и 2, показали, что они практически совпадают с теоретически рассчитанными значениями параметров разработанного МИО. Также были проведены дополнительные исследования, чтобы определить, оказывает ли влияние на магнитный момент корпус магнитного исполнительного устройства. Как показали испытания, корпус магнитного исполнительного устройства (МИУ) не оказал возмущающего воздействия на создаваемый магнитный момент.

Т а б л и ц а 1

Экспериментальные данные магнитного момента МИУ без корпуса

№ п/п	J = 0,2 A, U = 1,8 B			J = 0,38 A, U = 3,3 B		
	Mx, A·m ²	My, A·m ²	Mz, A·m ²	Mx, A·m ²	My, A·m ²	Mz, A·m ²
1	0,8942	0,0473	0,0406	1,1271	0,0525	0,0895
2	0,9041	0,0649	0,0132	1,1504	0,0571	0,0118
3	0,8752	0,0416	0,0382	1,1599	0,0772	0,0263

Т а б л и ц а 2

Экспериментальные данные магнитного момента МИУ в корпусе

№ п/п	J = 0,2 A, U = 1,8 B			J = 0,38 A, U = 3,3 B		
	Mx, A·m ²	My, A·m ²	Mz, A·m ²	Mx, A·m ²	My, A·m ²	Mz, A·m ²
1	0,8268	0,0411	0,0061	1,1437	0,0713	0,0291
2	0,9447	0,0146	0,0454	1,1767	0,0059	0,0155
3	0,8532	0,0423	0,0234	1,1623	0,0693	0,0371

Приведем сравнительную таблицу полученного МИО с аналогами, представленными на рынке.

Т а б л и ц а 3

Сравнительная таблица магнитных исполнительных органов

Название	Габариты, мм	Магнитный момент, A·m ²	Потребление, Вт	Масса, г
Разработанный образец	7×150	0,9	0,36	70
SX-MT-1 [4]	16×140	1,00	0,4	200
CUBETORQUER M [5]	18×77	0,66	0,75	72
iMTQ Magnetorquer [3]	96×90×17	0,2	1,2	196

Новизна исследований подтверждена полученным патентом Российской Федерации [6].

Заключение. Таким образом, разработанный МИО обладает компактными габаритами, меньшим энергопотреблением и сопоставимым магнитным моментом, что подтверждает актуальность данной разработки и дальнейших исследований в данном направлении с целью применения в малогабаритных КА.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Овчинников, М.Ю.** Исследование быстродействия алгоритма активного магнитного демпфирования / Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010. № 16. 32 с.
2. ГОСТ 10160-75 Сплавы прецизионные магнитно-мягкие. Технические условия [Текст]. – Введ. 1976-01-01
3. Магнитные исполнительные органы [Электронный ресурс]. – URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-microsputnik/ispolnitelnye-organyi-sistemyi-orientaczii-stabilizaczii-i-navigaczii/magnitnie-ispolnitelnie-organi> (дата обращения: 23.05.2024).
4. CUBESPACE CUBETORQUER [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cubespace.co.za/products/gen-1/actuators/cubetorquer/> (дата обращения: 23.05.2024).
5. **Костюков, А. С.** Разработка исполнительных органов активной магнитной системы ориентации для студенческого наноспутника SIBCUBE класса CubeSat / А.С. Костюков, Д. М. Зуев, С. А. Бабич // Решетневские чтения. – 2014. – Т. 1. – С. 502-503.
6. Пат. №2823985. Российская Федерация. Магнитная система ориентации нано- и микро- спутников. Белоконов И.В., Ивлиев А.В., Кумарин А.А.; заявитель и патентообладатель - Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева; заявка № 2023130442; приоритет от 21.11.2023 г.; опубликовано 28.05.2024 г.

D.O. Gavrilov, A.V. Ivliev, Samara National Research University (Samara University). **Development of magnetic actuator for attitude control system for nanosatellites**

Abstract. Attitude control is important for many of small satellites missions. In this study, we have developed a magnetic actuator for attitude control system, which is more energy- and volume efficient.

В. БОНДАРЕНКО

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

РАЗРАБОТКА 6-ОСЕВОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОЙ ХИРУРГИИ

В статье представлены результаты разработки 6-осевого робота-манипулятора для стереотаксической хирургии. Роботизированный манипулятор может быть использован для хирургического лечения глубоко расположенных опухолей головного мозга, для внутримозговой имплантации электродов для стимуляции головного мозга у больных болезнью Паркинсона, для лечения эпилепсии и др. Подробно описана экспериментальная модель недорогого робота-манипулятора. Основными требованиями к стереотаксическому роботизированному манипулятору являются: рабочее пространство не менее 0,4 м³, точность позиционирования $\pm 0,5$ мм. Возможность изменения угла наклона стереотаксического инструмента при сохранении координат его конечной точки, совместимость с хирургическими навигационными системами, соответствие требованиям к медицинскому оборудованию. Результаты фантомного тестирования манипулятора в операционной с использованием хирургической оптической навигационной системы показали, что этот манипулятор можно использовать для всех видов стереотаксических хирургических вмешательств на головном мозге.

Ключевые слова: медицинская робототехника, управление роботом, манипуляторы, кинематика робота, программирование робота, результаты испытаний

Введение. В настоящее время опухоли головного мозга представляют собой очень серьезную проблему. Заболеваемость составляет от 2 до 25 человек на 100000 населения ежегодно. Опухоли головного мозга составляют примерно 6-8% всех опухолевых заболеваний. Широкое использование томографии значительно улучшило диагностику опухолей головного мозга. Многие опухоли локализуются в моторных, зрительных или речевых областях головного мозга (примерно 35% всех опухолей головного мозга) [1-3]. В этом случае, удаление опухоли может привести к повреждению важных участков головного мозга. Таким образом, хирургические вмешательства в этих областях являются очень рискованными и редко выполняются. В то же время, быстрое развитие хирургической навигации и малоинвазивной нейрохирургии позволило хирургически лечить опухоли головного мозга с помощью стереотаксических операций. Стереотаксические операции включают в себя наведение стереотаксического инструмента через фрезевое отверстие на черепе в заранее намеченные точки мозга с помощью специальных нейрохирургических манипуляторов. Этот метод позволяет проводить операции на глубинных и функционально значимых участках головного мозга, в противном случае недоступных для стандартных открытых нейрохирургических вмешательств. Кроме того, это значительно снижает риск послеоперационных осложнений. Стереотаксические операции применяются также для имплантации внутримозговых электродов для стимуляции у больных болезнью Паркинсона, для диагностики и лечения эпилепсии и некоторых других заболеваний головного мозга [4]. В течение многих лет механические каркасные системы использовались для этого типа операций. В 1993 году Акционерное Общество «Концерн ЦНИИ "Электроприбор" и Институт мозга человека им. Н. П. Бехтерева Российской академии наук разработали и запустили в серийное производство стереотаксический механический манипулятор "Ореол", показанный на рис.1 [5, 6, 7]. В настоящее время развитие хирургической техники показывает тенденцию к усилению роли автоматизации. Успешное внедрение хирургических роботов в общую хирургию, кардиохирургию, и офтальмологию вызвало интерес к использованию роботизированных манипуляторов в нейрохирургии. Многие клиники уже несколько лет используют стереотаксические роботизированные манипуляторы. Использование роботизированных манипуляторов для стереотаксической биопсии и имплантации электродов свидетельствует об успешном развитии этой области [8]. Стереотаксические роботизированные манипуляторы имеют много преимуществ. Наиболее важными из них являются снижение сложности нейрохирургического вмешательства, снижение риска человеческого фактора, повышение точности наведения на целевые точ-

ки, и сокращение общей продолжительности нейрохирургических вмешательств [9]. Но большинство современных манипуляторов для стереотаксической нейрохирургии дороги и нуждаются в специальном операционном пространстве. Основными участниками рынка стереотаксических роботов являются "Renishaw Plc" (Великобритания) и "MedTech SAS" из Франции (в 2014 году была куплена компанией Zimmer Biomet USA). Обе компании продают стереотаксические роботизированные манипуляторы с 5 или 6 осями. Цена составляет около миллиона долларов США. Поэтому создание недорогого и компактного роботизированного манипулятора для стереотаксической нейрохирургии крайне актуально.



Рис.1. Механический стереотаксический манипулятор "Ореол"

Концепция. Основная идея этого проекта заключается в создании недорогого медицинского оборудования, пригодного для эффективного и безопасного хирургического лечения распространенных заболеваний центральной нервной системы. Основные требования к стереотаксическому роботизированному манипулятору, предъявляемые медицинскими партнерами следующие: рабочее пространство не менее $0,4\text{ м}^3$, точность позиционирования $\pm 0,5\text{ мм}$, Возможность изменения угла наклона стереотаксического прибора при сохранении координат его конечной точки, совместимость с оптическими и электромагнитными хирургическими навигационными системами, соответствие требованиям к медицинскому оборудованию.

Цель этого проекта по снижению цен достигается за счет исключения применения дорогостоящих деталей, таких как: моментные двигатели, прецизионные энкодеры и токоподводы. Функциональная схема манипулятора приведена на рис.2. Шаговый двигатель M и гармонический редуктор GU были выбраны для привода всех осей. Расчетный срок службы выбранных редукторов составляет 15000 часов, а их стоимость в России менее 1000 долларов США. Для обратной связи по углу был использован многооборотный энкодер AME . Срок службы подшипника энкодера составляет $3,6 \times 10^8$ оборотов, а среднее время до опасного отказа (EN ISO 13849-1) составляет 230 лет. Этот тип энкодера широко используется и продается в России за 400 долларов США. Безопасность пациентов, которая всегда имеет самый высокий приоритет, была главной причиной использования электромагнитной тормозной муфты EC для каждой оси манипулятора. Миниатюрный контроллер шагового двигателя $MSMC$ используется на каждой оси, чтобы уменьшить количество линий и обеспечить электромагнитную совместимость. Две CAN-шины используются для управления приводами и обратной связи. Эта архитектура позволяет полностью остановить манипулу и сохранить его положение во время хирургического вмешательства. Как известно, а 6-осевой роботизированный манипулятор может достигать любой точки своей области с любой заданной ориентацией, поэтому описанная система имеет 6 осей.

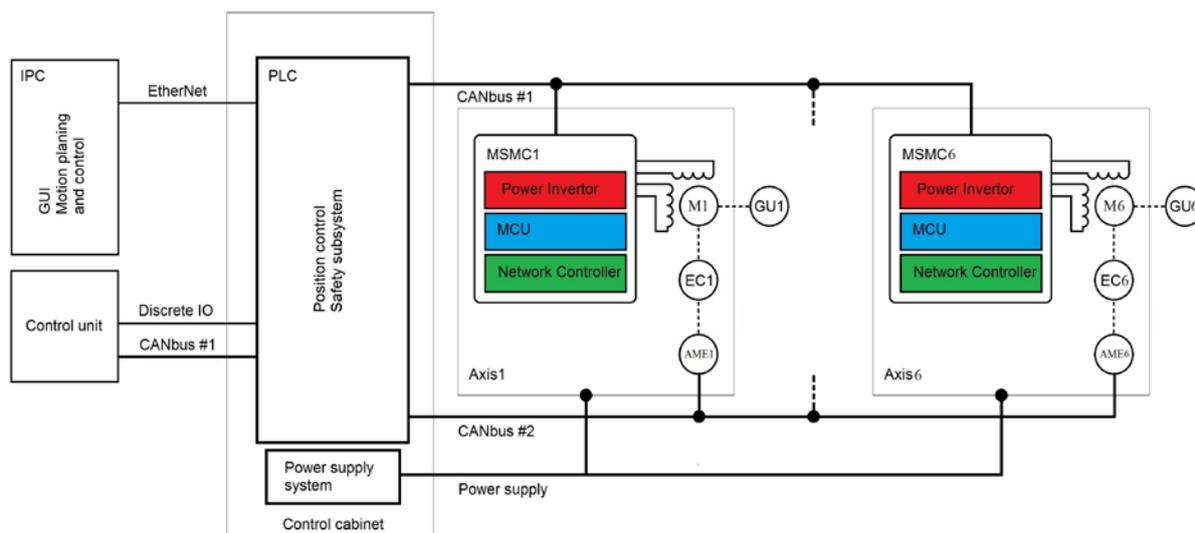


Рис.2 Функциональная схема робота манипулятора

Программируемый логический контроллер *PLC* используется для управления положением и в качестве системы безопасности. Система электропитания устроена таким образом, что позволяет питать отдельные части всей системы отдельно. Она может отключить все *MSMC* и активировать все *EC* в тоже время для сохранения ориентации манипулятора в случае отказа источника питания или любой аварийной ситуации. *MSMC* и *AME* имеют внутренние подсистемы безопасности, поэтому *PLC* получает их фактическое состояние каждые 10 мс. через *CAN*-шины. *PLC* непрерывно контролирует скорость и положение всех осей. Если ось заблокирована или скорость ее движения слишком высокая, то *ПЛК* немедленно активирует процедуру по аварийной остановке. Такая же процедура будет активирована в случае аварийного состояния любого *MSMC* или *AME*. Графический пользовательский интерфейс, планирование движения и все расчеты реализованы на промышленном персональном компьютере *IPC* с сенсорным экраном. Обмен данными между *PLC* и *IPC* реализован через быстрое соединение *Ethernet*. Движение манипулятора контролируется оператором с помощью джойстика, размещенного в блоке управления *CU*. *CU* также содержит механические кнопки, которые позволяют изменять режим работы, управлять питанием и немедленно останавливать манипулятор в случае возникновения аварийной ситуации. Поэтому манипулятор довольно прост и большая часть его комплектующих имеет низкую стоимость.

Прототип системы. Создан прототип системы. Фото прототипа приведено на рис.3. Прототип был разработан как комбинация всех основных частей, закрепленных на общем основании. Манипулятор, блок управления, шкаф управления и промышленный ПК механически соединены через поворотные рычаги со специальной медицинской тележкой. Прототип манипулятора был изготовлен с использованием простых алюминиевых фрезерованных деталей. Подшипники редукторов используются как несущие. Шаговые двигатели и энкодеры закрыты декоративными крышками, изготовленными методом 3D-печати. Пульт управления выполнен из алюминия и имеет пластинчатую поверхность с пиктограммами для оператора. Компактный низкопрофильный джойстик с бесконтактным датчиком Холла расположен в центре пульта управления. Джойстик соединен с *PLC* через *CAN*-шину. 15-дюймовый *IPC* с корпусом из не-

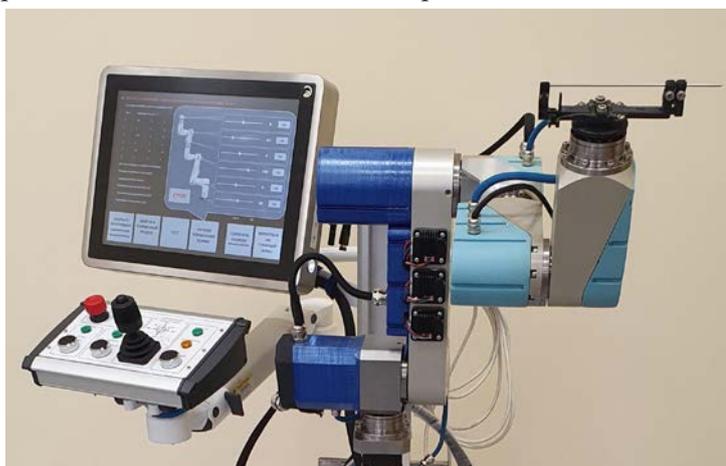


Рис.3 Прототип системы

ржавеющей стали, специально разработанный для удовлетворения жестких условий эксплуатации. Все подвижные части манипулятора были измерены с помощью высокоточной координатно-измерительной машины. Полученные данные используются для расчета в алгоритмах планирования и управления движением.

Планирование движения и контроль. Для управления любым манипулятором требуется информация об относительном положении и ориентация конечного звена. Эта информацию можно определить с помощью задач кинематики. Винтовая теория и точечное произведение экспонент были использованы для решения прямой и обратной кинематики. Подход, основанный на экспонентах, был выбран в качестве самого быстродействующего, который может обеспечить быстрые вычисления, поскольку он использует интегрирование вместо производной [9]. Помимо высокой точности расчета, требуется высокая точность изготовления механической части, что приведет к увеличению стоимости манипулятора. Чтобы избежать увеличения производственных затрат, все отклонения были измерены и учтены в кинематической модели. Геометрия осей была определена с высокой точностью (10-8). Для решения прямой задачи были использованы экспоненциальные произведения. Обратная задача кинематики решена с использованием итерационного численного метода нахождения корней Ньютона-Рафсона. Следует отметить, что даже малые численные погрешности могут привести к нарушению основных свойств специальной ортогональной группы элементов $SO(3)$. Для решения этой проблемы были опробованы различные методы. Наиболее точной является проекция числовых значений в пространство $SO(3)$, то есть своего рода нормализация. Следующей задачей было планирование траектории. Управление осями робота было обеспечено регулированием скорости, так как скорость движения должна быть достаточно низкой, чтобы обеспечить хорошее управление в любой опасной ситуации. Поскольку управление должно быть независимым от окружающей среды и от собственной динамики, предпочтительным методом является управление скоростью. Для использования в контроле был выбран конкретный метод определения ошибок. Расчет был выполнен в пространстве задач в соответствии с (1), где R_d – это желаемая ориентация конечного звена, а p_d – желаемые координаты, текущая ориентация и текущее положение отмечены без индекса.

$$X_e(t) = \begin{bmatrix} \log R^T(t) R_d(t) \\ p_d(t) - p(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Кроме расчета погрешности управления, был реализован метод формирования траектории для обеспечения плавной траектории движения конечного звена в соответствии с (2), где $s \in [0, 1]$.

$$X(s) = X_{start} \exp(\log(X_{start}^{-1} X_{end})s) \quad (2)$$

Такой подход обеспечивает движение конечного звена одновременно с изменением ориентации и положения инструмента от исходной конфигурации к целевой [10].

Исходя из требований к совместной работе с хирургической навигационной станцией, предусмотрено два специальных режима работы манипулятора для оператора. Первый режим дает возможность перемещать стереотаксический инструмент в трех плоскостях. Второй позволяет изменять угол наклона стереотаксического инструмента, при этом координаты его конечной точки остаются неизменными. Всеми движениями можно легко управлять с помощью джойстика. Графический пользовательский интерфейс позволяет одним касанием установить стереотаксический инструмент вблизи одной из 24 анатомических зон черепа, при этом конфигурация осей манипулятора будет обеспечивать оптимальную видимость для хирургической навигационной станции. Подсистема безопасности проверяет все параметры манипулятора и его частей в режиме реального времени. Основными функциями подсистемы безопасности являются: проверка целостности данных, превышение скорости, превышение тока, превышение температуры и контроль препятствий. Подсистема безопасности регистрирует все типы аварийных сигналов и сохраняет состояние системы незадолго до аварийного события.

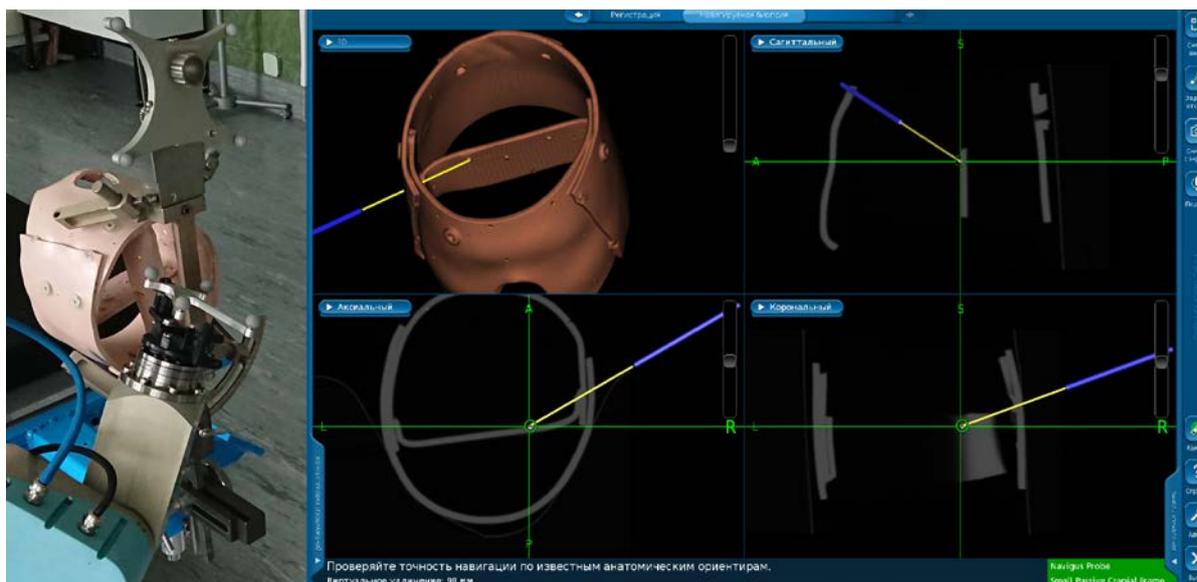


Рис.4 ситуационные тесты в нейрохирургической операционной

Тесты. После изготовления прототип манипулятора прошел проверку точности позиционирования. Для каждой оси была проведена проверка точности позиционирования. Использовалась 24-гранная призма и оптический автоколлиматор. Точность позиционирования составляет 55 ± 5 угловых секунд для любой оси. Для следующих испытаний использовалась высокоточная координатно-измерительная машина. Точность позиционирования манипулятора 0.35 мм по стандарту ISO 9283 была подтверждено. Прототип системы прошел ситуационные испытания в нейрохирургической операционной. В качестве тестового объекта использовалась фантомная модель [12]. Адгезивные маркеры использовались для интраоперационной регистрации и в качестве имитаторов внутримозговых целевых точек. Аппарат General Electric Healthcare Discovery 710 PET/CT был использован для сканирования фантома следующим образом: срезы $0,625$ мм и размер пикселя $0,5 \times 0,5$ мм. данные томографии были загружены в систему Medtronic StealthStation S7, которая обеспечивает оптическую хирургическую навигацию в реальном времени. Во время испытаний хирургическая навигационная система отслеживала положение зонда Medtronic Navigus, установленного на конечном звене манипулятора. Программное обеспечение хирургической навигационной системы отображает данные с различных точек зрения: аксиальной, сагиттальной, корональной. Во время всех испытаний использовалось виртуальное удлинение конечной точки зонда. Манипулятор, зонд и пример экрана программного обеспечения показаны на рис.4. Реальная часть зонда помечена синим цветом, а виртуальная желтым. Прицеливание осуществлялось тремя простыми шагами. Сначала зонд автоматически перемещался манипулятором в ближайшую анатомическую зону. На втором этапе перемещение манипулятора в трех измерениях позволило найти положение манипулятора, при котором координаты конечной точки зонда (с учетом виртуального удлинения) совпали с координатами целевой точки в ортогональных плоскостях мозга. На третьем этапе появилась возможность изменять угол наклона зонда, при этом координаты конечной точки зонда оставались неизменными. Только лишь джойстик использовался для управления манипулятором. После наведения зонд был заменен стереотаксическим инструментом, погруженным в фантом. Длина стереотаксического инструмента была равна виртуально удлиненному зонду. Во время все испытаний целевые точки фантома были достигнуты стереотаксическим инструментом. Современные оптические системы обеспечивают 3D-отслеживание положения маркеров, прикрепленных к инструментам, в режиме реального времени. Данные измерений фиксируются с точностью выше 1 мм. [11]. Во время испытаний, можно было перемещать конечное звено манипулятора с шагом, равным $0.06-0.07$ мм в любом направлении и оптическая навигационная система отображала новое значение измеренных данных только через 2-3 таких шага.

Вывод. Был разработан и изготовлен прототип стереотаксического манипулятора. Во время испытаний была определена точность позиционирования манипулятора - 0.35 мм по стандарту ISO 9283. Манипулятор показал возможность изменять угол наклона стереотаксического инструмента, при этом координаты его конечной точки оставались прежними. Он успешно прошел фантомные испытания в нейрохирургической операционной с использованием хирургической оптической навигационной системы. Конструкция прототипа позволяет перемещать стереотаксический инструмент более точно, чем может измерить хирургическая оптическая навигационная система. Испытания показали возможность использования этого манипулятора для всех видов стереотаксических хирургических вмешательств на головном мозге, включая биопсию, внутримозговую имплантацию электродов, а также стереотаксическое разрушение внутримозговых опухолей и подкорковых структур в функциональной нейрохирургии. Несмотря на то, что грузоподъемность манипулятора ограничена на примерно 1 кг, низкая стоимость деталей, точное управление и другие функции делают его пригодным для различных применений. В настоящее время ведется разработка серийного манипулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мартынов Б. В., Холявин А. И., Низковолос В. Б., Парфенов В. Е., Труфанов Г. Е., Свистов Д. В. стереотаксическая криодеструкция глиом / Чернов М. Ф., Мурагаки Ю., Кесари С., Маккатчен И. Е. (ред.): внутричерепные глиомы. Часть III-инновационные методы лечения. Prog Neurol Surg. Basel, Karger, 2018, vol 32, pp 27-38.
2. А. И. Холявин, В. Б. Низковолос, В. Н. Очколяс, А. Д. Аничков, А. Ф. Гурчин, Р. Ю. Селиверстов, Т. Ю. Скворцова. Стереотаксическое нейрохирургическое лечение глиальных опухолей головного мозга с применением криохирургии и позитронно-эмиссионной томографии: учебно-методическое пособие/ Под ред. Н.а. Беляева. А.Д. Аничкова. - СПб: РИЦ ПСПбГМУ, 2018. - 20 С.
3. Б.М. Никифоров. Klinicheskie Клинические лекции по неврологии I и нейрохирургии. SPb: Piter, 1999 г. 352 с.
4. W.Дж. Маркс-младший (ред.). Deep Управление глубокой стимуляцией мозга management. - Cambridge University Press, 2010. - 168 С.
5. А.Д. Аничков, М. А. Никитин, Ю.З. Полонский, А. Б. Попов, В. Б. Низковолос, А. В. Обляпин, Н. Г. Шкурина, новаяуниверсальная стереотаксическая система, актуальные вопросы стереонейрохирургии эпилепсии, рОДре Д. В. П. Берснева. – спб.: RNKhI, 1993, pp. 177–187.
6. М. А. Никитин. Стереотаксический манипулятор "ореол", клинический стереотаксис. Опыт и перспективы применения отечественного нейрохирургического манипулятора "ореол": СПб., 2001, pp. 6-8.
7. Ю.З. Полонский, А. И. Холявин, В. В. Мартынов, В. Е. Парфенов, Г. Е. Труфанов, безрамная расчетная магнитно-резонансная томография со стереотаксическими манипуляторами класса «ореол», Вестник Российской Военно-Медицинской Академии 2009 – № 4 (28), pp. 71-78.
8. D. фон Лангсдорф, П. паки, Д. Фонтейн, In vivo измерение точности применения фрейма на основе нейрохирургического робота neuromate, J нейрохирургия. – 2015. – Том. 122(1), pp. 191-194.
9. F. Cardinale, M. Rizzi, P. d’Orio et al., Новый инструмент для бесконтактной регистрации пациентов для роботизированной внутричерепной хирургии: точность применения из фантомного исследования и ретроспективной хирургической серии, нейрохирургический фокус. – 2017. – Том. 42 (5). - E8.
10. М. Л. Кевин, К. П. Франк, Modern robotics: mechanics, planning and control, Cambridge University Press, 2017.
11. А.Д. Уайлс, Д.Г. Томпсон, Д.Д. Frantz, Accuracy assessment and interpretation for optical tracking systems, Medical imaging 2004: visualization, image-guided procedures and display. Международное общество оптики и фотоники, с. 421–432.
12. А. И. Холявин, В. Б. Низковолос, А. А. Богдан. Оценка качества наведения стереотаксического прибора на точку прицеливания в головном мозге с помощью бескаркасной навигационной системы / биомедицинская инженерия (2018) Том.52, выпуск 2., С. 92-95

Viktor Bondarenko (Join-stock company State Research Centre of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor St.Petersburg, Russia). **Development of a 6-axis Robotic Manipulator for Stereotactic Surgery**

Abstract. The paper presents the results of development of a 6-axis robotic manipulator for stereotactic surgery. The robotic manipulator can be used for the surgical treatment of deep-located brain tumors, for the intracerebral implantation of electrodes for brain stimulation in patients with Parkinson Disease, for the treatment of epilepsy, etc. The experimental model of the low-cost robotic manipulator is described in details. Basic requirements for stereotactic robotic manipulator are as follows: workspace is not less than 0.4 m³, position accuracy is ± 0.5 mm, the ability to change the angle of the stereotactic instrument while the coordinates of its end point are the same, compatibility with the surgical navigation systems, and compliance with the requirements for medical equipment. The results of a phantom testing of the manipulator in the neurosurgery operation room using the surgical optical navigation system showed that it is possible to use this manipulator for all types of stereotactic surgery interventions on the brain.