

И. Х. АФШАР, М. Р. ДЕЛАВАР, Б. МОШИРИ

НОВОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ВНУТРИТРУБНОЙ НАВИГАЦИИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ В СНАРЯДЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО МОДУЛЯ

В статье исследуется задача позиционирования первого в Тегеране магистрального газопровода (Тегеран–Кухнамак) с использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) на базе инерциального измерительного модуля (ИИМ) с микромеханическими чувствительными элементами (МЭМС), установленного на внутритрубном инспекционном (диагностическом) снаряде (далее – снаряд). Снаряд позволяет выработать координаты трубопровода протяженностью 111 км с дискретностью 4 мм. За основу решения навигационной задачи принят обобщенный фильтр Калмана (ОФК) с применением вариации Аллана для анализа и уточнения исходных данных. Одновременно используется специальный фильтр, данные которого комплексируются с данными ОФК, что обеспечивает коррекцию углов рыскания и тангажа, вырабатываемых снарядом. Для повышения надежности решения задачи вдоль трубопровода размещены 98 магнитных маркеров, координированные по данным GPS, а также в качестве измерений в ОФК привлекаются данные одометра. Полученные результаты свидетельствуют о том, что такой гибридный подход позволяет повысить точность позиционирования трубопровода примерно на 81% по сравнению с базовым алгоритмом ОФК. Кроме того, предложенный алгоритм позволяет повысить точность позиционирования на 32% и быстродействие на 55% по сравнению с разработанным в настоящее время другим интегрированным решением ОФК/РСТ, в котором также регистрируются соединения труб (РСТ).

Ключевые слова: ОФК, одометр, неголономные ограничения, ИИМ с микромеханическими чувствительными элементами, БИНС.

Введение

Трубопроводы являются основным средством транспортировки газа и нефте-содержащих продуктов от источника к месту назначения. В Иране большая часть протяженных магистральных трубопроводов была построена более 80 лет назад. Часть информации о местоположении проложенных трубопроводов за прошедшие

Афшар Исмаил Хатефи. Аспирант, Технический колледж, Тегеранский университет (Иран).
ORCID 0000-0003-0950-7038.

Делавар Махмуд Реза. Доктор наук, профессор, Технический колледж, Тегеранский университет.
ORCID 0000-0002-9654-6491.

Мошири Бехзад. Доктор наук, профессор, Технический колледж, Тегеранский университет.
ORCID 0000-0002-8390-4093.

годы была утрачена, поэтому задача тщательного обследования этих трубопроводов с целью исключения рисков, связанных с естественным и техногенным смещением труб, а также с появлением их внутренних дефектов (утечек, коррозии, трещин и борозд), является чрезвычайно важной.

Внутритрубный диагностический снаряд представляет собой эффективное средство поиска и локализации дефектов в трубопроводах. На нем устанавливаются дефектоскопические и измерительные датчики, которые обнаруживают дефекты и их местоположение во время движения снаряда внутри обследуемого трубопровода [1]. Согласно статистике, природные факторы становятся причиной аварий на нефте- и газопроводах только в 8% случаев [2].

Как известно, применение инерциальных датчиков может обеспечить высокоточную информацию о местоположении, скорости и ориентации объекта лишь на коротком интервале времени, поскольку с его ростом точность этой информации быстро снижается. Для устранения таких погрешностей требуются дополнительные средства, в качестве которых используется внешний измеритель скорости – одомер, входящий в состав снаряда, а также нанесенные на поверхность труб магнитные маркеры, позволяющие получить по данным глобальной системы позиционирования GPS точные координаты опорных (реперных) точек трубопровода с интервалом приблизительно в один километр [3]. Во время движения снаряда внутри трубопровода дефектоскопические датчики обнаруживают магнитные маркеры и регистрируют временные метки прохождения опорных точек трубопровода с известными координатами.

ИИМ, на базе которого строится инерциальная навигационная система (ИНС), обеспечивает измерение вектора кажущегося ускорения и угловой скорости внутритрубного снаряда, а применение ИНС позволяет сформировать координаты как центральной оси трубопровода, так и местоположения аномалий и специфических элементов трубопровода [4]. Использование опорных маркеров играет определяющую роль в нахождении координат дефектных участков, а также позволяет учесть топографические условия расположения трубопровода в труднодоступных местах [5].

ИИМ содержит как минимум шесть инерциальных датчиков: три акселерометра и три гироскопа. Если при этом используются датчики с невысокой точностью, то происходит быстрое накопление погрешностей выработки навигационных параметров. В связи с этим надежные и точные средства для внутритрубной навигации пользуются большим спросом. Одним из возможных решений для повышения точности позиционирования снаряда является комплексирование информации датчиков различной природы и применение для оценки состояния системы фильтра Калмана (ФК).

ФК является рекурсивным фильтром, алгоритм которого реализуется в два этапа. На этапе прогноза фильтр Калмана экстраполирует значения переменных состояния, а также их неопределенности. На втором этапе по данным измерений результат экстраполяции уточняется. Благодаря пошаговой природе алгоритма он может в реальном времени отслеживать состояние объекта с использованием только текущих измерений и информации о предыдущем состоянии системы. ФК обеспечивает эффективную оценку переменных вектора состояния для решения навигационной задачи в пределах временных интервалов, когда информация с маркеров или одомер могут обеспечить достоверные данные измерений [6]. Для задач нелинейного характера, к каковым и относятся задачи навигации, используется обобщенный фильтр Калмана (ОФК).

С развитием компьютерных технологий стала широко применяться бесплатформенная ИНС (БИНС). Эта система позволяет избавиться от механически сложной

платформенной конструкции и обеспечивает установку инерциальных датчиков непосредственно на корпусе движущегося объекта, позволяя формировать измерения непосредственно в связанной с объектом системе координат. БИНС имеет множество преимуществ, в том числе более низкую стоимость, меньший размер и более высокую надежность по сравнению с платформенными ИНС [4]. В исследуемой задаче в составе БИНС внутритрубного снаряда используются гироскопы, акселерометры и одометр, закрепленные с другими датчиками на жесткой раме и подключенные к мощным цифровым процессорам для обработки сигналов [5].

В работе [7] описан метод применения БИНС для определения местоположения снаряда в подводных трубопроводах; при этом подчеркивается, что преимущества БИНС обеспечивают возможность определения местоположения снаряда независимо от внешней среды.

Анализ стохастического шума инерциальных датчиков предполагает определение его характеристик путем оценки таких параметров, как случайный уход и дрейф нуля из графиков вариации Аллана. Использование дисперсии Аллана – один из наиболее популярных способов получения точных значений этих параметров путем задания всех возможных интервалов осреднения [8], именно поэтому дисперсия Аллана и ее модификации применяются в большинстве исследований [8–12]. Благодаря простоте вычислений в настоящем исследовании для моделирования погрешностей и уточнения параметров ФК используется перекрывающаяся оценка дисперсии Аллана.

Основное внимание в предлагаемой работе уделяется новому методу решения задачи фильтрации для определения местоположения снаряда при использовании ИИМ на основе МЭМС, который можно применять в снарядах для исследования трубопроводов малых диаметров.

ИИМ на основе МЭМС характеризуются большими погрешностями и высоким уровнем шума. Следовательно, для решения проблем, связанных с этим явлением, необходимо привлечение дополнительных источников информации и введение определенных ограничений. В частности, предлагаемый в работе алгоритм использует информацию о прохождении снарядом поперечных сварных швов, соединяющих трубы.

Соединение труб, показанное на рис. 1, представляет собой сварной шов между двумя прямыми трубами или между прямой и изогнутой трубами. В настоящей работе соединения труб определяются методом вейвлетов в соответствии с [13, 14], после чего можно рассчитать длину трубы между двумя соединениями. Судя по рис. 2, анализ выходных измерений акселерометров ИИМ с помощью вейвлетов позволяет эффективно обнаружить соединение труб.

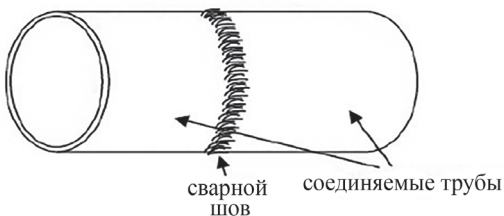


Рис. 1. Соединение труб [13]

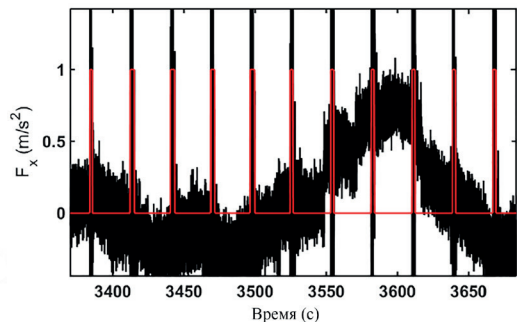


Рис. 2. Соединения труб: моделирование [13]

Работа [15] посвящена углубленному исследованию метода высокоточного позиционирования снаряда при его навигации в трубопроводах малого диаметра. Авторы предложили систему позиционирования внутритрубного снаряда на основе данных микромеханических датчиков, GPS, одометра и алгоритма, основанного на РСТ. Исследуется механизм применения ОФК в системе навигации внутритрубного снаряда для повышения общей точности позиционирования снаряда малого диаметра. Метод РСТ позволяет определить два угла Эйлера (тангаж и рыскание) и тем самым повысить эффективность применяемого алгоритма фильтрации. В результате применения указанного метода повысилась точность параметров позиционирования и, как следствие, их среднеквадратическая погрешность (СКП) уменьшилась более чем на 85%. Новый метод получил название ОФК/РСТ. Его преимущества заключаются в хороших показателях точности для трубопроводов малого диаметра, а также в отсутствии необходимости использовать дополнительные дорогостоящие датчики. Недостатком же этого метода является введение неголономных ограничений в уравнениях ОФК, что приводит к огромной вычислительной нагрузке на алгоритм ОФК. К неголономным относятся ограничения угловой скорости вращения снаряда по углам рыскания и тангажа при движении снаряда в трубопроводе. Метод ОФК/РСТ был опробован только в лабораторных условиях, поскольку его применение в реальном трубопроводе длиной в несколько километров при интервале выборки, составляющем несколько миллиметров, занимает продолжительное время.

В нашем исследовании удалось преодолеть ограничения, описанные в [15], что было подтверждено фактическими данными натурных испытаний на газопроводе Тегеран–Кухнамак длиной 111 км и диаметром 0,762 м.

В большинстве предыдущих исследований введение неголономных ограничений в матрицы ОФК приводит к увеличению числа уравнений, что влечет за собой увеличение времени решения задачи и вероятность расходимости алгоритма.

Основная цель исследования – повысить точность позиционирования внутритрубного снаряда при сокращении времени реализации алгоритма. Для этого на снаряд необходимо установить ряд датчиков, в том числе акселерометры и гироскопы в составе ИИМ, одометр и датчик магнитных контрольных точек. В исследовании применяется метод, основанный на использовании нового ограничивающего фильтра для снаряда (ОФС), интегрированного с ОФК для создания алгоритма ОФК/ОФС. Входными данными для этого алгоритма являются показания инерциальных и неинерциальных датчиков, а выходными – значения углов, скорости и координат. Таким образом, преимущества нового метода в сравнении с предыдущими исследованиями [1, 4, 14, 16] заключаются в повышении точности позиционирования и ускоренном времени выполнения алгоритма. Поскольку в БИНС используются инерциальные данные с невысокой точностью определения навигационных координат, со временем погрешность инерциальных измерений нарастает, что приводит к снижению точности определения местоположения. Следовательно, фактором, повышающим точность определения координат, являются данные измерений, которые повышают точность при коррекции обновляемой части измерений в фильтре Калмана. Таким образом, чем больше количество измерений в навигационной задаче, тем выше будет точность определения координат. При этом только следует учитывать, что увеличение количества измерений не влияет на скорость выполнения алгоритма, которой и посвящена эта статья.

Статья состоит из 4 разделов. Вначале описывается сам метод ОФК/ОФС, далее исследуется эффективность предложенного метода. В заключительном разделе представлены выводы и предложены некоторые перспективные направления дальнейших исследований.

Метод ОФК/ОФС

ОФК и его улучшенные варианты представляют собой нелинейные алгоритмы фильтра Калмана, которые наиболее широко используются в технике [17]. В настоящем разделе представлена информация о контролируемых параметрах, проведенном анализе, а также о БИНС, в которой применен алгоритм ОФК/ОФС.

Контролируемые параметры

Внутритрубный снаряд оснащен дефектоскопическими датчиками и двумя основными бортовыми системами – ИИМ и одомером. Дефектоскопические датчики в рамках данного исследования используются для обнаружения магнитных маркеров. ИИМ применяется для измерения кажущегося ускорения и угловой скорости с помощью соответственно акселерометров и гироскопов, а одомер – для измерения скорости движения снаряда вдоль продольной оси трубопровода. Измерения ИИМ являются трехмерными и вырабатываются в связанной со снарядом системе координат. В исследовании используется МЭМС ИИМ MPU-9150 фирмы InvenSense [18]. В состав измерительного модуля MPU-9150 входят три гироскопа и три акселерометра.

В исследовании задействовано 11 контролируемых параметров, представленных в табл. 1, которые были получены с интервалом 4 мм на всем протяжении трубопровода Тегеран–Кухнамак длиной 111 км.

Таблица 1

Исходные данные

1	Кажущееся ускорение X	7	Потребление тока
2	Кажущееся ускорение Y	8	Скорость по одомеру
3	Кажущееся ускорение Z	9	Одометрическая доминанта
4	Угловая скорость X	10	Временная метка
5	Угловая скорость Y	11	Магнитное поле
6	Угловая скорость Z		

Скорость движения снаряда по трубопроводу измеряется, как правило, не одним одомером, а тремя, установленными в задней части снаряда. Простое осреднение скорости по данным трех одометров в каждой точке выборки используется в качестве одометрической доминанты. Для повышения надежности съемки применяются опорные точки с известными координатами, расположенные по длине трассы трубопровода с шагом порядка 1 км.

Проходя мимо магнитных маркеров, дефектоскопические датчики внутритрубного снаряда фиксируют изменение магнитного поля, при этом регистрируется временная

метка интервала выборки, характеризующая момент поступления точных координат трубопровода для решения навигационной задачи. Параметр «потребление тока» измеряется простым электрическим датчиком, установленным на снаряде, который позволяет измерить количество электроэнергии, израсходованной снарядом во время движения. Когда снаряд останавливается, потребление тока приближается к нулю.

На рис. 3 показаны координаты трубопровода Тегеран–Кухнамак в географической системе координат (ГСК). На трубопроводе установлено 98 опорных точек и 20 запорно-регулирующих клапанов. Координаты опорных точек используются для формирования позиционных измерений для ОФК, а клапаны – для оценки полученных с помощью ОФК результатов. Расстояния между опорными точками трубопровода Тегеран–Кухнамак различаются по величине и в некоторых случаях составляют до 5 км. Следует также отметить, что на трубопроводе имеются 22 изгиба.

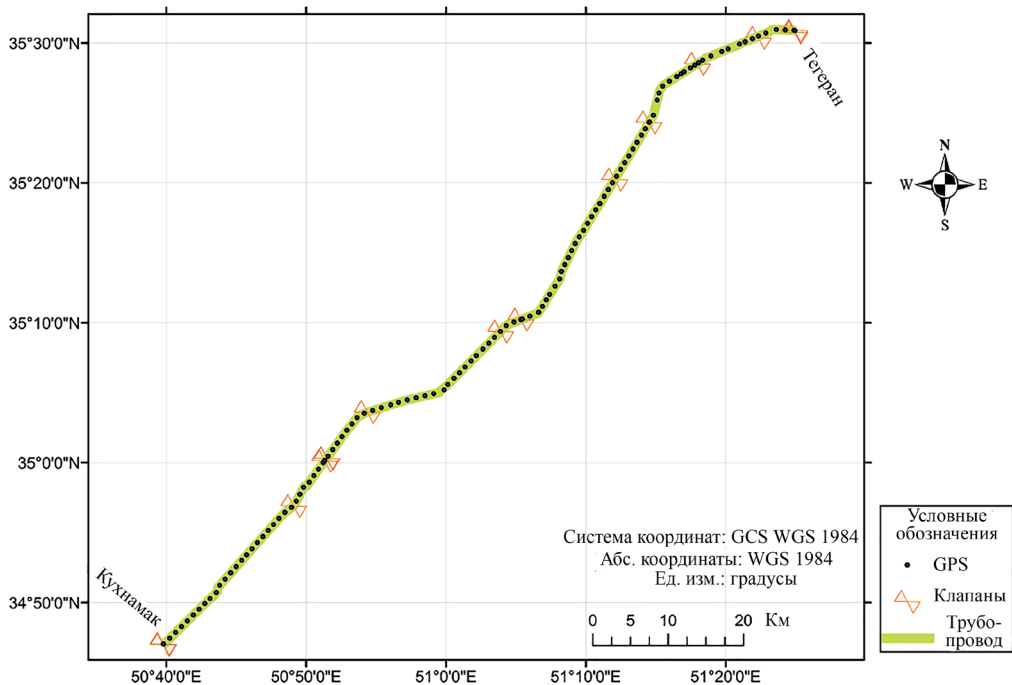


Рис. 3. Трубопровод Тегеран–Кухнамак

Модель погрешностей ИИМ

Выходные данные ортогонального трехосного гироскопа и акселерометра моделируются соответственно по формулам (1) и (2):

$$\tilde{\omega}^b = \omega_{ib}^b + VRW + DB_G + BC_G, \quad (1)$$

$$\tilde{f}^b = f_{ib}^b + ARW + DB_A + BC_A, \quad (2)$$

где ω_{ib}^b – значения составляющих угловой скорости снаряда в связанной с объектом системе координат, которые представляют собой идеальные выходные данные гироскопа, а f_{ib}^b – идеальные значения составляющих кажущегося ускорения в той

же системе координат. Остальные члены уравнений представляют различные типы погрешностей акселерометров и гироскопов: случайное блуждание по углу (ARW), случайное блуждание по скорости (VRW), смещения нулей (DB_A, DB_G) и нестабильность смещения нулей (BC_A, BC_G).

При использовании перекрывающейся оценки дисперсии Аллана серия измерений частично перекрывает исходную серию, и благодаря этому используемый набор данных становится исчерпывающим [8]. Анализ в таком случае выполняется так же, как и для стандартной дисперсии Аллана. Таким образом, выполненный в рамках этой работы анализ применим к обоим вариантам. В настоящем исследовании инструментом оценивания является перекрывающаяся оценка дисперсии Аллана, которая используется для уточнения и инициализации матриц дисперсии в фильтре Калмана. Такой метод оценивания рекомендован IEEE [19] и поэтому широко применяется для определения характеристик датчиков на основе МЭМС.

На графике в двойном логарифмическом масштабе перекрывающаяся оценка дисперсии Аллана позволяет выделить различные источники погрешностей по изменениям наклона кривой. При условии правильного выбора значений времени корреляции можно получить информацию о погрешностях датчиков: ARW ; VRW ; DB_A, DB_G и BC_A, BC_G . Результаты анализа с перекрывающейся оценкой дисперсии Аллана представлены в табл. 2. Некоторые из указанных параметров можно взять из руководства по эксплуатации измерительного модуля MPU9150 или получить в процессе калибровки [13]; однако в рамках данного исследования для получения этих параметров при уточнении исходных данных для ОФК был выбран метод перекрывающейся оценки дисперсии Аллана, чтобы повысить достоверность данных и уменьшить затраты на калибровку. Параметр ARW характеризует шум измерения угла, который описывается среднеквадратической погрешностью (СКП) при интегрировании выходного сигнала гироскопа. Параметр VRW представляет шум измерения скорости при интегрировании сигнала акселерометра, который характеризует среднеквадратическое отклонение, возрастающее во времени аналогично ARW . Эти параметры применяются при расчете СКП матриц шумов Q и R в ОФК.

Таблица 2

Результаты расчета методом перекрывающейся оценки дисперсии Аллана для датчиков ИИМ

	X	Y	Z	Ед. изм.
ARW	0,0118	0,0119	0,0135	рад/с
VRW	0,0050	0,0048	0,0057	м/с ²
DB_G	0,0099	0,0101	0,0042	рад/с
DB_A	0,0005	0,0004	0,0038	м/с ²
BC_G	0,6000	0,6000	600	рад/с
BC_A	600	700	600	м/с ²

Поскольку внутритрубный снаряд движется в жидкостной или газовой среде внутри трубопровода, на стенках которого присутствуют различные отложения, возникают микроколебания снаряда во всех направлениях. В силу этого все измерения акселерометров и гироскопов содержат разного рода шумы. Помимо этого, на уско-

рение акселерометра по оси Z влияет гравитационное поле Земли, и это ускорение с учетом широты места необходимо корректировать в каждой точке. На рис. 4 и 5 показаны данные измерений акселерометров и гироскопов, полученные через каждые 4 мм 111-километрового трубопровода.

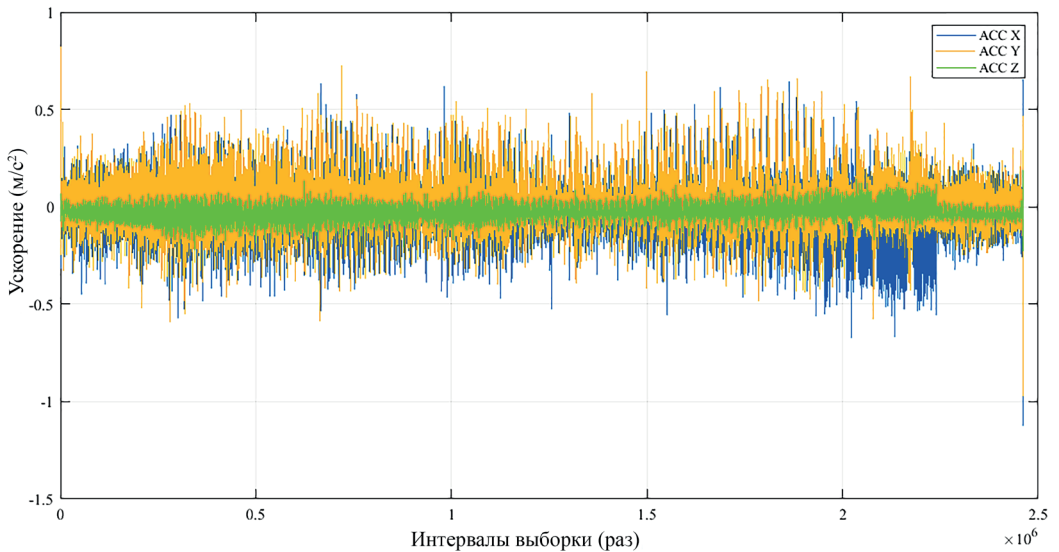


Рис. 4. Ускорение внутритрубного снаряда

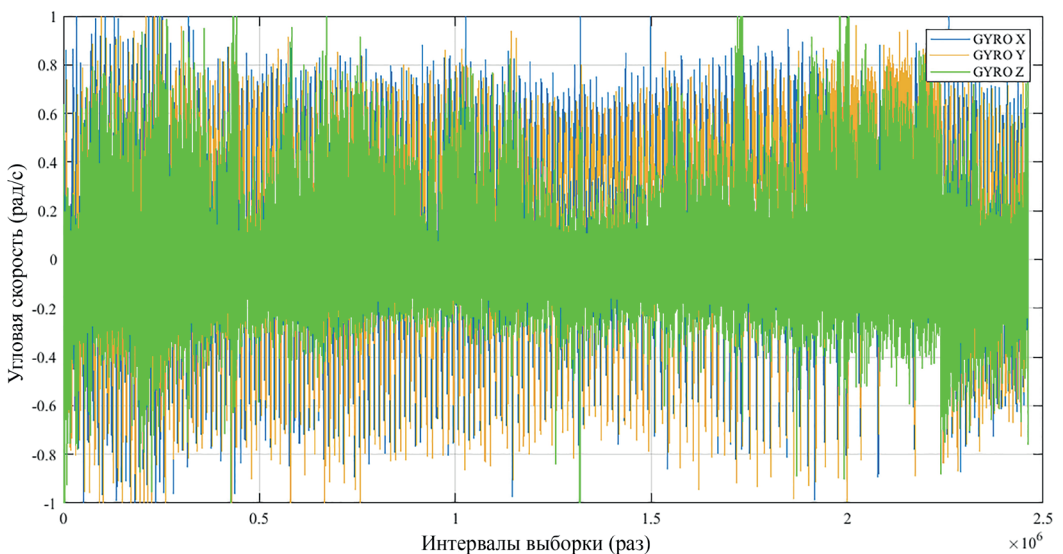


Рис. 5. Угловая скорость внутритрубного снаряда

Бесплатформенная инерциальная навигационная система

В этой работе для решения навигационной задачи используются две системы координат (СК) – навигационная и связанная с объектом. В качестве навигационной

СК применяется ГСК. Углы рыскания (ψ), тангажа (θ) и крена (ϕ) определяют положение связанной с объектом СК относительно ГСК. Повороты этих основных СК относительно друг друга выполняются с помощью матриц направляющих косинусов (МНК) [10]. Следует отметить, что верхний индекс каждого параметра в формулах (3)–(14) обозначает систему координат: b для СК объекта и n для навигационной СК. Нижние индексы указывают, является ли параметр измеренным в заданной СК или скорректированным. В данном случае оси навигационной СК направлены на север, восток и вниз (N, E, D), а оси СК, связанной с объектом, обозначаются как ϕ, θ, ψ . Все необработанные данные ИИМ измеряются в СК, связанной с объектом.

На рис. 6 показана работа БИНС, в которой на каждом шаге решения задачи формируются обновленные данные шести выходных параметров. Обновление этих параметров также производится и после получения выходных данных ОФС и ОФК.



Рис. 6. Схема бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) [20]

Предлагаемое решение задачи позиционирования внутритрубного снаряда должно учитывать дискретность измерений, полученных с пространственным шагом 4 мм трубопровода. Чтобы применять ОФК, должен быть определен интервал выборки (dt), который можно получить из столбца «Временная метка» табл. 1, где представлены исходные данные. С точки зрения вычислительной нагрузки уравнения БИНС делятся на две основные части: уравнения выработки параметров ориентации и выработки навигационных параметров. Поскольку оценка параметров ориентации в ОФК подразумевает огромный объем вычислений, эта часть требует большего внимания и ее необходимо моделировать для сокращения времени вычислений [17]. Так как снаряд может застрять в трубе, вычисление параметров его ориентации гораздо важнее высокоточной выработки данных о его пространственном положении. В связи с этим в настоящей работе предложен алгоритм интегрирования, который решает эту задачу с помощью неголономных ограничений. Ниже описываются основные условия постановки задачи БИНС.

Выработка параметров ориентации. Выработка параметров ориентации снаряда в БИНС выполняется тремя разными методами: с помощью матрицы направляющих косинусов (МНК), углов Эйлера и методом кватернионов. Все эти методы используют соответствующие уравнения. Параметры, полученные в результате их решения,

могут преобразовываться друг в друга. Выработка составляющих угловой скорости снаряда в ГСК производится в соответствии со следующими уравнениями [21]:

$$\omega_{en}^n = \begin{bmatrix} V_E / (R_N + h) \\ -V_N / (R_M + h) \\ -\frac{V_E \times \tan(Lat)}{R_N + h} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где ω_{en}^n – угловая скорость вращения снаряда в ГСК; Lat и h – широта и высота местоположения снаряда в ГСК; V_N и V_E – северная и восточная составляющие абсолютной линейной скорости снаряда; R_N, R_M – радиусы кривизны нормальных сечений референц-эллипсоида в меридиональной плоскости и в плоскости первого вертикала [10].

Вычисление ориентации снаряда должно выполняться перед вычислением его линейной скорости, для того чтобы обеспечить преобразование в ГСК кажущегося ускорения. С использованием уравнения (4) угловые скорости, измеренные гироскопами, корректируются на каждом шаге решения задачи с учетом вычисленной угловой скорости вращения снаряда в ГСК. Для вычисления МНК и углов Эйлера в рамках данного исследования выполняется вычисление первого кватерниона по формуле (5) с использованием функции g , после чего выполняются другие преобразования по формуле (6) [21, 22]:

$$Gyro_u^b = Gyro^b - (C^{bn})^T \times (w_{ie}^n + w_{en}^n), \quad (4)$$

$$q_u = g(q, Gyro_u^b, dt), \quad (5)$$

$$q_u = q_u / norm(q_u), \quad (6)$$

где q_u – кватернион в СК, связанной с объектом; C_u^{bn} – МНК между СК, связанной с объектом и ГСК; $Euler_u$ – угол Эйлера в СК, связанной с объектом; $Gyro^b$ – показания гироскопа в СК, связанной с объектом; $Gyro_u^b$ – показания гироскопа с учетом угловой скорости вращения снаряда в ГСК; $qua2dcm$ и $qua2euler$ – простые функции для преобразования кватернионов в МНК и углы Эйлера соответственно [22]. Функция g позволяет вычислить кватернион с использованием показаний гироскопов в связанной с объектом СК. Более подробное описание таких преобразований представлено в работе [20]. Такого рода вычисления применяются на всех шагах решения задачи по данным акселерометров и гироскопов. Представленный контур вычисления БИНС используется через каждые 4 мм рассматриваемого трубопровода длиной 111 км.

Проекция кажущегося ускорения. Кажущееся ускорение и угловая скорость внутритрубного снаряда измеряются ИИМ в связанной с объектом СК. Для использования этих параметров при выработке координат снаряда необходимо сформировать матрицу вращения, которая представлена в (7) [22]. Коррекция выработанных в БИНС углов Эйлера производится при регистрации мест соединений всех без исключения труб с помощью ОФК. При этом данные об изменениях каждого угла

передаются в БИНС, после чего выполняется расчет матрицы поворота между СК, связанной с объектом, и ГСК по формулам (8) и (9) [10], где ϕ – угол крена; θ – угол тангажа; ψ – угол рыскания; R_1 – матрица поворота для ψ ; R_2 – матрица поворота для θ ; R_3 – матрица поворота для ϕ ; f^n – кажущееся ускорение в ГСК (N, E, D); C^{bn} – МНК для перехода из связанной с объектом СК в ГСК:

$$f^n = (C^{bn} \times f^b), \quad (7)$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix},$$

$$C^{bn} = R_3 \times (R_2 \times R_1). \quad (9)$$

Выработка линейной скорости. Линейная скорость на текущем шаге вычисляется по информации о скорости на предыдущем шаге, угловой скорости вращения снаряда в ГСК, силе тяжести и кажущемся ускорении, измеренных ИИМ в соответствии с (10) и (11) [22], где V_u^n – линейная скорость в ГСК на текущем шаге решения задачи; V^n – значение скорости в ГСК на предыдущем шаге; ω_{ie}^n – угловая скорость вращения снаряда в инерциальной СК; ω_{en}^n – угловая скорость вращения снаряда в ГСК; g – сила тяжести в навигационной СК; dt – шаг решения задачи; S – кососимметричная матрица вектора линейной скорости в ГСК; $Rates$ – кориолисово ускорение; Δf^n – коррекция показаний кажущегося ускорения в ГСК. Следует отметить, что запуск внутритрубно-го снаряда производится в пусковой камере, расположенной в начале трубопровода, поэтому начальное значение скорости для данного параметра задается в виде нулевого вектора. Применение скоростных измерений в ОФК обеспечивает уточнение скорости, измеренной одометром, а также расстояния между местом расположения ИИМ и одометром:

$$S = skew(V^n) \rightarrow Rates = S \times (\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n), \quad (10)$$

$$\Delta f^n = f^n - Rates - g \rightarrow V_u^n = V^n + (\Delta f^n \times dt). \quad (11)$$

Вычисление координат местоположения. Начальное положение трубопровода определяется координатами первой опорной точки. Расчет местоположения каждой точки по трассе трубопровода должен производиться в навигационной СК. Текущие координаты местоположения являются функцией предыдущего состояния, скорости и шага решения задачи. Все искомые параметры вычисляются в навигационной СК с помощью формул (12)–(14) [23], где $[Lat_u, Lon_u, h_u]$ – текущие значения широты,

долготы и высоты места объекта в навигационной СК; $Pos^n = [Lat, Lon, h]$ – матрица координат местоположения объекта на предыдущем шаге; $[V_N, V_E, V_D]$ – вектор линейной скорости в ГСК; V_{uD}, V_{uN}, V_{uE} – значения составляющих угловой скорости в ГСК; dt – шаг решения задачи [10]:

$$h_u = h - V_D \times dt, \quad (12)$$

$$V_{un} = V_N / (R_M + h) \rightarrow Lat_u = Lat + V_{uN} \times dt, \quad (13)$$

$$V_{uE} = V_E / ((R_N + h) \times \cos(Lat_u)) \rightarrow lon_u = Lon + V_{uE} \times dt. \quad (14)$$

Начальная выставка ИИМ. Начальная выставка представляет собой процесс определения начальной ориентации объекта в связанной с объектом СК и ГСК, которая выполняется во время нахождения снаряда в пусковой камере в трубе. Поскольку МЭМС-гироскопы характеризуются высокими значениями дрейфа и низким соотношением «сигнал–шум», применить аналитическое гиروهоризонтирование и гироскопирование не представляется возможным. Тем не менее можно рассчитать углы крена (ϕ) и тангажа (θ) по формулам [13]:

$$\phi = \arcsin \frac{f_y}{g}, \quad (15)$$

$$\theta = \arcsin \frac{f_x}{g}. \quad (16)$$

Начальный курс обычно имеет высокую степень неопределенности, поэтому в случае использования внутритрубного снаряда значение курса либо просто назначается, либо определяется с помощью высокоточного ИИМ на МЭМС, который используется во втором методе данного исследования.

Базовый и интегрированный алгоритмы ОФК

В данной работе описаны три метода на основе применения ОФК. Первый из них – базовый ОФК, представляющий собой традиционный ОФК, который ранее использовался во многих решениях навигационной задачи. Второй метод – ОФК/РСТ, разработанный авторами [13] в 2016 г. Третья форма ОФК, получившая название ОФК/ОФС, предлагается в этом исследовании (см. соответствующий раздел). Формирование матриц ОФК и уравнений для базового ОФК и ОФК/РСТ описывается кратко с указанием ссылок на литературу, а метод ОФК/ОФС будет рассмотрен более подробно.

Базовый ОФК. Согласно нелинейным уравнениям модели оценки состояний БИНС и характеру алгоритма фильтра Калмана, в решении навигационной задачи используется нелинейная гауссовская модель в пространстве состояний. Первая строка в (17) относится к части прогноза состояния ОФК, которая содержит уравнения БИНС. В этой части ОФК данные акселерометров и гироскопов используются для прогноза следующего состояния. Вторая строка в (17) относится к части уточнения состояния в ОФК с использованием измерений одометра и опорных точек трубопровода с известными координатами:

$$\begin{aligned}
 X_t &= F_t X_{t-1} + G_t u_t + \xi_t, \\
 Z_t &= H_t X_t + v_t, \text{ with } \begin{cases} \xi_t \sim N(0, Q_t) \\ v_t \sim N(0, R_t) \end{cases}
 \end{aligned} \tag{17}$$

где X_t – вектор состояния системы в момент времени t ; F_t – нелинейная функция, характеризующая соотношение текущего и предыдущего векторов состояния и линеаризованная методом разложения в ряд Тейлора с точностью до членов более высокого порядка (19); G_t – исходная матрица, рассчитанная по формуле (20); u_t – исходный вектор, содержащий погрешности акселерометров и гироскопов (21); ξ_t – шум системы; Z_t – вектор измерений; H_t – матрица измерений, описывающая связь между текущим вектором измерений и текущим вектором состояния; v_t – шум измерений. Параметры ξ_t и v_t являются взаимозависимыми случайными величинами, полученными на основании центрированной функции плотности вероятности белого гауссова шума с известными матрицами ковариации Q_t и R_t , задаваемыми соответственно (23) и (24). Формирование матриц в (18)–(24) подробно описано в [13, 20]. Состояния в навигационной задаче включают погрешности δ ориентации, местоположения и скорости, однако предполагается, что дрейфы гироскопов и смещения нулей акселерометров тоже относятся к переменным вектора состояния, которые оцениваются на каждом шаге решения задачи dt с помощью формулы

$$X_t = (\delta r, \delta v, \delta \varepsilon, \delta b_{gyro}, \delta b_{acc})^T \in \mathbb{R}^{15 \times 1}, \tag{18}$$

где δr – вектор погрешности местоположения внутритрубного снаряда; δv – вектор погрешности линейной скорости снаряда; $\delta \varepsilon$ – вектор погрешности углов вращения снаряда (ϕ, θ, ψ). Параметр dt – это время, за которое снаряд перемещается на 4 мм по трассе трубопровода, δb_{acc} – вектор погрешности знания смещения нулей акселерометров, а δb_{gyro} – вектор погрешности знания дрейфов гироскопов, которые инициализируются с помощью алгоритма перекрывающейся оценки дисперсии Аллана с использованием параметров из табл. 2. Следует учесть, что слишком большие значения dt приведут к значительной погрешности, а слишком малые – к очень высокой трудоемкости обработки данных. Поскольку в данном исследовании было принято малое значение dt для достижения точности позиционирования снаряда менее 5 м, возникла необходимость в алгоритме, который бы позволил сократить время обработки данных:

$$F_t \{15 \times 15\} = \begin{bmatrix} O & F_{pv} & F_{pp} & O & O \\ F_{ve} & F_{vv} & F_{vp} & O & DCM \\ F_{ee} & F_{ev} & F_{ep} & -DCM & O \\ O & O & O & F_5 & O \\ O & O & O & O & F_6 \end{bmatrix}, \tag{19}$$

$$G_t \{15 \times 12\} = \begin{bmatrix} -DCM & O & O & O \\ O & DCM & O & O \\ O & O & I & O \\ O & O & O & I \end{bmatrix}, \tag{20}$$

$$u_t\{12 \times 1\} = \begin{bmatrix} \omega^b & f^b & \eta_{gyro} & \eta_{acc} \end{bmatrix}^T, \quad (21)$$

$$H_t\{6 \times 15\} = \begin{bmatrix} I & O & O & O \\ O & DCM & O & O \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$R_t\{6 \times 6\} = \begin{bmatrix} R_1 & O \\ O & R_2 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$Q_t\{12 \times 12\} = \begin{bmatrix} Q_1 & O & O & O \\ O & Q_2 & O & O \\ O & O & Q_3 & O \\ O & O & O & Q_4 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$O = \text{Zeros}(3 * 3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Более точная и подробная информация о параметрах формул (18)–(23) представлена в [13, 20]. Заданный вектор измерений в задаче позиционирования снаряда содержит опорные точки с известными координатами и измерения, полученные от трех одометров. В задаче ОФК эти измерения используются для коррекции погрешностей. Вектор измерений Z_t определяется по формуле

$$Z_t = (\delta R, \delta V)^T \in \mathbb{R}^{6 \times 1}, \quad (25)$$

где δR – разность значений координат опорных точек и соответствующих координат БИНС, а δV – разность скоростей, измеренных с помощью одометров и вычисленных в БИНС. Как уже говорилось, GPS используется только для определения координат опорных точек и формирования базы данных. Система навигации внутритрубного снаряда определяет временную метку обнаруженного магнитного репера и идентифицирует контрольную точку. Таким образом, точное местоположение снаряда устанавливается по базе данных. В соответствии с условием навигационной задачи, поставленной в данной работе, интервалы наблюдения опорных точек не совпадают с интервалами получения информации от ИИМ и одометров (4 мм по трассе трубопровода), поэтому при отсутствии каких-либо наблюдаемых параметров в (25) в определенной временной точке соответствующие строки в матрицах Z и H можно просто удалить.

Поскольку на снаряде установлен одометр для измерения скорости снаряда внутри трубы в связанной с объектом СК, предполагается, что в этой СК снаряд движется только вперед. Разумеется, во время движения снаряда возникают некоторые отклонения и помехи, однако они пренебрежимо малы, поэтому в базовом алгоритме ОФК эти два неголономных ограничения для удобства принимаются нулевыми. Таким образом, для вычисления δV в базовом ОФК применяется формула (26), которая описывает вектор измерений скорости (V^b) в СК объекта, где V_{odo} – измеренная скорость поступательного движения снаряда:

$$V^b = (V_{odo}, 0, 0). \quad (26)$$

ОФК/РСТ. Внутритрубные снаряды относятся к наземным движущимся объектам, поэтому при решении навигационной задачи учитываются определенные неголономные ограничения. В данном случае такими ограничениями могут быть два угла Эйлера (θ , ψ) и скорость по одометру в конкретных направлениях, которые можно использовать в измерительной части ОФК. Ограничениями по углам Эйлера в трубопроводе является угол тангажа, представляющий собой поворот снаряда вокруг оси X связанной с объектом СК, и угол рыскания ψ , представляющий собой поворот снаряда вокруг вертикальной оси Z этой СК по направлению движения снаряда. Поскольку в каждой отдельной трубе снаряд может вращаться только вокруг собственной оси, что создает угол крена ϕ , углы θ , ψ являются постоянными во всех прямых трубах. Вместе с тем на изогнутых участках трубопровода углы θ , ψ будут изменяться, и тогда будет работать другая стратегия, как показано на рис. 9. Трубопровод состоит из множества прямых и изогнутых труб, соединенных сварными швами. В каждой из прямых труб длиной около 12 м углы θ , ψ не могут изменяться согласно допущению алгоритма Сали [14], поэтому изменения их значений должны быть равны нулю.

Таким образом, аппроксимированные значения изменений углов θ , ψ могут быть представлены в виде

$$\delta z_{\theta, \psi}^v = \hat{\epsilon} - \tilde{\epsilon}, \quad (27)$$

где $\hat{\epsilon}$ – расчетный вектор рыскания и тангажа, а $\tilde{\epsilon}$ – измеренный вектор рыскания и тангажа. Параметр $\hat{\epsilon}$ в трубопроводе рассчитывается по элементам расчетной МНК (\hat{R}_v^l), а $\tilde{\epsilon}$ – по измеренным компонентам МНК (R_b^l). Углы рыскания и тангажа снаряда в трубопроводе вычисляются следующим образом [14]:

$$\hat{R}_v^l = \hat{R}_b^l (R_b^v)^T = [I - \Psi] R_b^l (R_b^v)^T, \quad (28)$$

где R_j^k – МНК из СК (j) в СК (k); b, l, v – соответственно СК ИИМ, локальная (навигационная) СК и СК, связанная с объектом; R_b^v – неизменяемая величина (константа). Матрица Ψ представляет собой кососимметрическую матрицу вектора вращения, относящуюся к погрешности ориентации МНК.

При коррекции измерений в ОФК эту неголономную часть можно ввести в виде формулы (29). По сравнению с формулой (25) здесь размерность матрицы измерений увеличивается до 8×1 :

$$Z_t = \left(\delta R, \delta V, \delta z_{\theta, \psi}^v \right)^T \in \mathbb{R}^{8 \times 1}. \quad (29)$$

Матрицы ОФК/РСТ формируются так же, как и в базовом ОФК; единственная разница заключается в том, что в методе ОФК/РСТ в части измерений вместо формулы (25) используется формула (29). Неголономные ограничения, введенные в измерения ОФК/РСТ, существенно влияют на повышение точности [1, 4, 14]. Как известно, в задачах с фильтром Калмана есть две основные области: «обновление состояния или времени» и «обновление измерений». В области «обновление времени» коррекция выполняется на каждом интервале времени, а в области «обнов-

ление измерений» коррекция зависит от наличия или отсутствия данных измерений на этом интервале. В связи с этим «обновление измерений» из фильтра Калмана можно вводить в вычисления, например, через каждые 10 или более интервалов. Таким образом, при решении навигационной задачи в данной статье данные измерений (одометра) вводятся в уравнения фильтра Калмана в составе матрицы Z_p , что позволяет использовать область «обновление измерений» фильтра Калмана в вычислениях на всех интервалах времени. Ввиду особых условий данного исследования размерность матрицы Z_i приобретает очень большое значение в связи с ее активным использованием в вычислениях. Таким образом, при введении ограничений на измерения в области «обновление измерений» фильтра Калмана размерность матриц Z_i и H_i в алгоритме ОФК/РСТ возрастает, следовательно, его выполнение потребует больше времени, а в некоторых случаях может возникнуть расходимость результатов решения навигационной задачи. Кроме того, ограничение параметра в процессе работы ОФК не позволяет надлежащим образом использовать скорректированные состояния ОФК. Матрицы ОФК/РСТ подробно описаны в разделе 5.5 работы [13]. Таким образом, в алгоритме ОФК/РСТ матрицы F_p , G_p , u_i аналогичны матрицам базового ОФК, но при этом выражение для Z_i меняется на формулу (29), а H_i учитывает большее количество параметров в соответствии с формулой (31):

$$H_{\theta,\psi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial \delta \phi} & \frac{\partial \theta}{\partial \delta \theta} & \frac{\partial \theta}{\partial \delta \psi} \\ \frac{\partial \psi}{\partial \delta \phi} & \frac{\partial \psi}{\partial \delta \theta} & \frac{\partial \psi}{\partial \delta \psi} \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$H_{t\{8 \times 15\}} = \begin{bmatrix} I & O & O & O \\ O & DCM & O & O \\ O_{\{2 \times 3\}} & O_{\{2 \times 3\}} & H_{\theta,\psi} & O_{\{2 \times 3\}} \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Производные в формуле (30) рассчитываются в каждый момент формирования измерений гироскопами ИИМ. В нашем исследовании эти моменты времени соответствуют интервалам выборки, равным примерно 4 мм длины трубопровода, на которые перемещается внутритрубный снаряд. Разумеется, на изгибах труб такие расчеты производных не выполняются.

С учетом (26) значение скорости в СК объекта вычисляется методом ОФК/РСТ по формуле

$$V^b = (V_{odo}, V_y, V_z), \quad (32)$$

где V_{odo} – измеренное значение прямолинейной скорости снаряда; V_y и V_z – значения боковой и вертикальной скорости в СК объекта, которые могут считаться центрированными гауссовскими процессами. Что касается непосредственно движения снаряда, боковые и вертикальные составляющие скорости в СК объекта отсутствуют. Вместе с тем в реальных условиях эти ограничения нарушаются в силу различных факторов: наличия отложений в трубах, неровного рельефа на трассе, закрытых поворотов, вибраций снаряда и даже рассогласования между системами координат ИИМ и снаряда. В связи с этим в отличие от базового ОФК в алгоритме ОФК/РСТ

значения V_y и V_z не принимаются за абсолютный ноль, а модель их погрешности рассматривается в виде

$$\begin{bmatrix} V_{odo} - V_{x,INS} \\ V_y - V_{y,INS} \\ V_z - V_{z,INS} \end{bmatrix} = H_{t\{3:6 \times 15\}} X_t + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, \quad (33)$$

где V_{odo} , V_y , V_z – измеренные значения составляющих скорости с коррекцией по одометрам; $V_{x,INS}$, $V_{y,INS}$, $V_{z,INS}$ – значения составляющих скорости, вычисленные в БИНС; v_x , v_y и v_z – шум измерений скорости.

В методе ОФК/РСТ регистрация соединений труб должна выполняться до проведения камеральной обработки навигационных данных, чтобы сохранить информацию о соединениях трубопровода в файле. Этот файл будет использоваться в качестве исходных данных при камеральной обработке навигационной информации. В работе [13] были предложены два алгоритма обнаружения изгибов трубопровода, один из которых (основанный на определении величины угловой скорости) применяется в нашей реализации метода ОФК/РСТ. В период прохождения снаряда по изгибу трубы метод ОФК/РСТ прекращает действовать.

В результате использования формулы (29) точность позиционирования внутритрубного снаряда существенно увеличилась по сравнению с базовым ОФК [13], однако остались другие проблемы, которые удалось решить в этом исследовании. В этой модели углы θ , ψ не измеряются напрямую отдельными датчиками, как показано в (27), а вычисляются по показаниям акселерометров и гироскопов по формулам (3)–(6). Максимальная погрешность определения местоположения методом ОФК/РСТ значительно сократилась по сравнению с базовым ОФК, что показано в исследовании [13]. Следовательно, судя по характеру ОФК, даже при использовании большего количества неголономных ограничений, близких к реальным измерениям, точность позиционирования увеличивается.

ОФК/ОФС. Схема алгоритма обработки данных, которому посвящена эта статья, представлена на рис. 7. На первом этапе происходит загрузка показаний гироскопов и акселерометров и их обработки методом перекрывающейся оценки дисперсии Аллана [19]. Полученные параметры используются в БИНС, в которую входят два фильтра: ОФК и ОФС. После рекуррентного вычисления с помощью уравнений БИНС формируются выходные данные: координаты снаряда, параметры его ориентации и скорость через каждые 4 мм трассы трубопровода длиной 111 км. После проведения регистрации соединений труб используется алгоритм ОФС для коррекции ОФК, и, таким образом, в БИНС поступают уже откорректированные параметры. Данные одометров также используются для формирования скоростных измерений.

Ниже более подробно проанализируем каждый из этапов предлагаемого алгоритма. Регистрация соединений труб также рассматривается в качестве неголономных ограничений, однако новый алгоритм отличается от алгоритма ОФК/РСТ тем, что в ОФК учитываются не только откорректированные параметры ориентации, но и другие откорректированные переменные вектора состояния. Другими словами, формула (29) не используется для вычисления измерений в ОФК/ОФС, а формула (25) используется без изменений, при этом первая часть соотношения (17) учитывается в ОФС. В основе нового ОФС лежит рекуррентное вычисление с использова-

нием ОФК коррекции переменных состояния в каждом сегменте трубы. После того как вычисление параметров ориентации будет выполнено в БИНС, ОФС производит коррекцию углов θ , ψ на последнем шаге (последней временной метке) вычисления для каждой отдельной трубы, и эти данные передаются в БИНС в качестве исходных данных для следующего отрезка трубы. Как и в методе ОФК/РСТ, здесь предполагается, что углы θ , ψ имеют постоянные значения на прямолинейных участках трубопровода. Поскольку прямолинейные участки имеют разную длину, каждое значение длины получают с помощью вейвлет-алгоритма, применяемого к данным ИИМ [13]. Вместе с тем на трассе трубопровода имеются и изгибы. Изменения углов θ , ψ на изгибах будут отличаться от прямолинейных участков.



Рис. 7. Схема предлагаемого алгоритма

В алгоритме ОФС обработка данных производится только после того, как эти данные будут спрогнозированы с помощью ОФК для одного участка трубы с использованием уравнений базового ОФК. Когда внутритрубный снаряд движется по прямолинейному участку, ОФС выполняет анализ значений углов θ , ψ , спрогнозированных и откорректированных по алгоритму ОФК. Алгоритм ОФС устанавливает их значения как первое значение для соответствующей трубы. Комплексирование результатов алгоритмов ОФС и ОФК показано на рис. 8. Как видно из рисунка, углы θ , ψ должны быть одинаковыми в точках A и B в соответствии с неголономными ограничениями. Точка A является первой точкой измерения (первой временной меткой) на участке отдельной трубы, а точка B является последней точкой измерения (последней временной меткой) этой же трубы. Как показано на рис. 8, начиная от точки A алгоритм ОФК работает как базовый ОФК на участке трубы до тех пор, пока снаряд не достигнет точки B . С этого момента запускается алгоритм ОФС и получает значения углов θ , ψ из точки A , которые принимаются за θ_0 , ψ_0 и используются в качестве новых исходных данных для ОФК при обновлении состояний на следующем отрезке трубы в соответствии с откорректированными значениями θ , ψ . Коррекция других переменных вектора состояния выполняется с помощью базового алгоритма ОФК. Как показано на рис. 8, алгоритм ОФК останавливается перед каж-

дым соединением труб, и ОФС выполняет коррекцию углов θ, ψ в зависимости от того, на каком участке работает ОФК – прямолинейном или изогнутом. Результаты коррекции вектора состояния с помощью ОФС представлены в табл. 3 отдельно для прямолинейного отрезка трубы AB в точке B и для изогнутого отрезка CD в точке D .

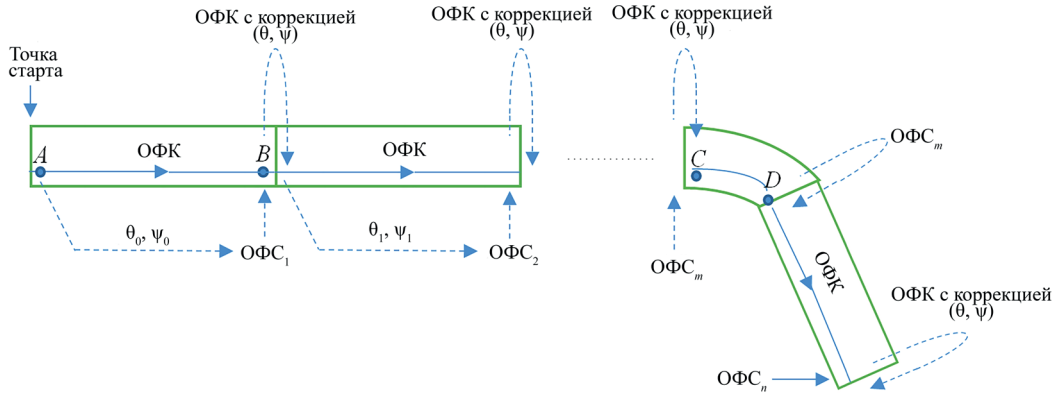


Рис. 8. Интегрирование ОФС и ОФК

Таблица 3

Коррекция состояний с помощью ОФС

Точка B	X_i до ОФС	$= (\delta r, \delta v, \delta \varepsilon \{ \delta \varphi_B, \delta \theta_B, \delta \psi_B \}, \delta b_{gyro}, \delta b_{acc})^T \in \mathbb{R}^{15 \times 1}$
	X_i после ОФС	$= (\delta r, \delta v, \delta \varepsilon \{ \delta \varphi_B, \delta \theta_A, \delta \psi_A \}, \delta b_{gyro}, \delta b_{acc})^T \in \mathbb{R}^{15 \times 1}$
Точка D	X_i до ОФС	$= (\delta r, \delta v, \delta \varepsilon \{ \delta \varphi_B, \delta \theta_A, \delta \psi_A \}, \delta b_{gyro}, \delta b_{acc})^T \in \mathbb{R}^{15 \times 1}$
	X_i после ОФС	$= \left(\delta r, \delta v, \delta \varepsilon \left\{ \delta \varphi_B, \delta \theta_B + \frac{1}{\alpha} \Delta \theta, \delta \psi_B + \frac{1}{\alpha} \Delta \psi \right\}, \delta b_{gyro}, \delta b_{acc} \right)^T \in \mathbb{R}^{15 \times 1}$

Механизм распознавания прямолинейных и изогнутых участков в навигационной системе внутритрубного снаряда основан на нескольких алгоритмах распознавания поворотов, описанных в работе [4]. Именно на поворотах данные ИИМ содержат наибольшую погрешность, что связано с геометрией траектории. Поэтому для решения задачи на изогнутых участках производится математическая коррекция углов θ, ψ в соответствии с рис. 9.

Значения $\Delta \theta$ и $\Delta \psi$ на рис. 9 взяты из иранского стандарта газовой отрасли, исполнительных чертежей трубопровода и карт профилей для каждого поворота, а ΔS представляет собой длину кривой изгиба. Параметры $\Delta \theta$ и $\Delta \psi$ на отдельном отрезке трубы крайне малы, и наибольшее расхождение этих двух параметров наблюдается на изгибах. Когда внутритрубный снаряд находится в точке D (последняя временная метка на изгибе CD), алгоритм ОФС анализирует углы $\delta \theta, \delta \psi$ и использует

значения $\Delta\theta$ и $\Delta\psi$ для их коррекции. После того как ОФС откорректирует углы $\delta\theta$ и $\delta\psi$ (эта коррекция выполняется и в части обновления данных ориентации), ОФК производит прогноз и уточнение переменных вектора состояния для следующего шага вычислений. Таким образом, алгоритм ОФС представляет собой оперативный фильтр, который применяется в ОФК для прогнозирования и коррекции состояний с максимально высокой точностью.

Тем не менее, поскольку в реальных условиях трубопровод имеет большую протяженность, существует высокий риск значительной погрешности определения углов θ , ψ из-за реальных условий среды, в которой находится снаряд. Это может привести к расходимости всего алгоритма определения местоположения, поскольку даже незначительная ошибка в вычислениях на криволинейных участках может привести к большой погрешности определения местоположения. В связи с этим на криволинейных участках для вычисления углов θ , ψ применяется математическая коррекция. Алгоритм ОФК/ОФС позволяет корректировать все состояния без ограничений во всех трубах, по окончании процесса ОФК на последней временной метке запускается ОФС. Данная процедура ОФК/ОФС применяется в процессе работы ОФК, откорректированные значения θ , ψ обновляются, и это влияет на другие коррекции переменных ОФК. Псевдокод алгоритма ОФК/ОФС представлен в табл. 4.

Таблица 4

Псевдокод ОФК/ОФС

```

jt: временная метка соединения = [j0, j1, ... .. ., jn]
bt: временная метка поворота = [b0, b1, ... .. ., bm]
ft: первая временная метка после соединения труб = [f1, f2, ... .. ., fn]
lt: последняя временная метка перед соединением труб = [l1, l2, ... .. ., ln]
        i: индекс it
        b: индекс bt
        если jt(i) = bt(b), то

при k = jt(i) + 1 до jt(i + 1) - 1
α = jt(i) - jt(i - 1)

θk = θjt(i-1) +  $\frac{1}{\alpha} \Delta\theta$ 

ψk = ψjt(i-1) +  $\frac{1}{\alpha} \Delta\psi$ 

Конец
Или же

инициализация {
    f1 - оценивание с использованием стартовой точки
    ОФК работает от f1 до l1
    ОФК останавливается
}

При k = 1 до размерности ft
ОФК работает от lk до lk+1
ОФК останавливается
ОФС извлекает (θ, ψ) для fk
ОФС корректирует (θ, ψ) для lk+1 в матрицах ОФК
Далее k
Конец, если
    
```

Описанный процесс происходит на прямолинейных участках трубопровода до тех пор, пока снаряд не войдет в изгиб трубы. Как показано в табл. 4, матрица jt сохраняет временные метки всех соединений труб, матрица bt сохраняет временные метки всех поворотов, ft и lt сохраняют соответственно первую и последнюю временные метки между двумя соседними соединениями. Значения $\Delta\theta$ и $\Delta\psi$ приняты в соответствии с исполнительными чертежами трубопровода и являются постоянными значениями для каждого поворота, как показано на рис. 9. Массив f_k соответствует первой временной метке измерений ИИМ после каждого соединения труб. Поскольку обработка навигационных данных производится в камеральном режиме, временные метки всех соединений, пройденных снарядом, сохранены в файл. Следовательно, f_k является первой временной меткой измерения ИИМ, полученного за период прохождения расстояния от 0 до 4 мм от каждого соединения труб.

Таким образом, устанавливаются два режима для определения углов θ и ψ при движении внутритрубного снаряда по прямолинейной траектории и на поворотах. В этих режимах формируются соответственно матрицы jt и bt . Следует заметить, что, поскольку оба конца изогнутого участка – это сварные соединения труб, bt является подмножеством jt . Кроме того, чтобы установить, что оба конца изогнутого участка являются соединениями труб, во время движения снаряда и маршрутного отслеживания геометрии трубы (прямолинейной или изогнутой), следует применять матрицу bt . Если временные метки bt и jt равны, значит, снаряд находится на изогнутом участке трассы.

Результаты

Навигационный эксперимент проводился в июне 2018 г. на магистральном трубопроводе Тегеран–Кухнамак. Протяженность исследуемого трубопровода составляла 111 км, а средняя скорость внутритрубного снаряда – около 2,5 м/с. Трасса газопровода была размечена магнитными маркерами с использованием GPS, в результате чего было создано 97 опорных точек и одна точка для определения начального азимута. Кроме того, при испытаниях навигационной системы снаряда использовались 20 наземных запорно-регулирующих клапанов, координаты которых определялись с помощью дифференциальной GPS со средней погрешностью 1 см. Расстояние между маркерами составляло от 1 (чаще всего) до 5 км. Перед запуском снаряд находился в пусковой камере в течение примерно 40 минут. За это время проводилась начальная выставка ИИМ на МЭМС для последующих вычислений при камеральной обработке данных [13].

Эффективность предложенного метода оценивалась в ходе натурных испытаний с использованием внутритрубного снаряда. Для сравнения применялись алгоритмы базового ОФК и ОФК/РСТ. При оценивании методом ОФК/ОФС после введения него-

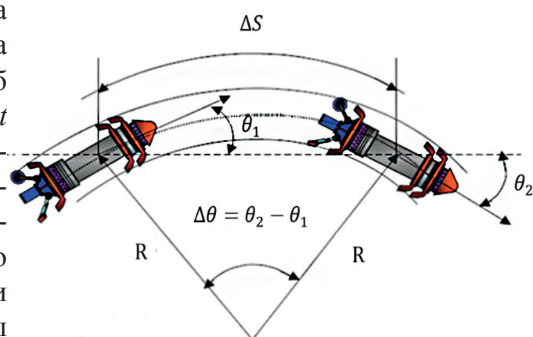


Рис. 9. Изменение угла тангажа θ на поворотах

лономных ограничений средняя погрешность навигационной системы внутритрубного снаряда снизилась на 81,02%, что подтверждает безусловное преимущество предложенного метода по сравнению с традиционными алгоритмами с точки зрения как точности определения местоположения снаряда, так и быстродействия алгоритма.

Интегрированные навигационные решения оценивались путем сравнения полученных координат снаряда с координатами местоположения клапанов, определенных с помощью дифференциальной GPS. Клапаны были установлены на трубопроводе для регулирования расхода газа. Когда снаряд находится в трубе и движется мимо клапанов, его дефектоскопический датчик фиксирует временную метку точки, в которой находится выходное отверстие клапана.

Отметим, что выходные координаты снаряда определяются на основе данных WGS84 и преобразовываются в универсальную поперечную проекцию Меркатора (UTM) для сравнения полученных результатов в метрах. Для удобства восточное, северное и вертикальное направления задаются как направления x , y , z соответственно.

Предложенная система становится устойчивой в плане погрешностей ее моделирования и неопределенности шума по сравнению с этими показателями в алгоритмах

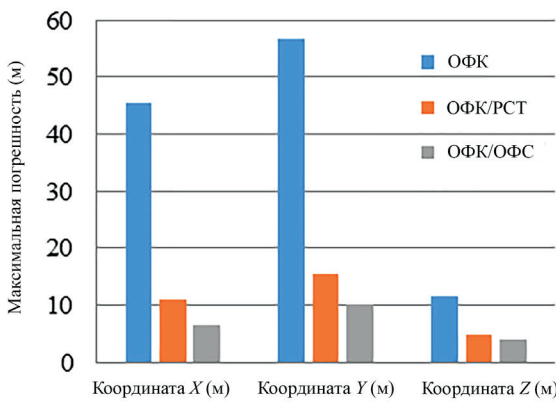


Рис. 10. Максимальные погрешности определения местоположения

базового ОФК и ОФК/РСТ. Максимальные погрешности определения местоположения в методах ОФК/ОФС, ОФК/РСТ и базового ОФК представлены на рис. 10 и в табл. 5, СКП определения местоположения – на рис. 11 и в табл. 6. Из приведенных данных следует, что оптимизация позволяет получить лучшие результаты, чем максимальные значения погрешности. Уменьшение погрешности в направлениях x и y составляет 55,44% и 33,33%.

Т а б л и ц а 5

Максимальные погрешности определения местоположения

	X (м)	Y (м)	Z (м)	По сравнению с базовым ОФК			По сравнению с ОФК/РСТ		
				+	+	+	+	+	+
Базовый ОФК	45,54	56,78	11,5						
ОФК/РСТ	11,12	15,51	4,73	+75,58%	+72,68%	+58,98%			
ОФК/ОФС	6,41	10,27	4,06	+85,92%	+81,91%	+64,79%	+42,36%	+33,78%	+14,16%

Результаты подтверждают, что оптимизации удастся добиться в направлении x . Это объясняется тем, что трасса трубопровода Тегеран–Кухнамак простирается с востока на запад, поэтому погрешности в направлении x должны быть меньше, чем в направлении y . Как видно из табл. 5, при использовании метода ОФК/ОФС максимальные значения погрешности в направлениях x и y уменьшились на 42,36% и 33,78% по сравнению с методом ОФК/РСТ.

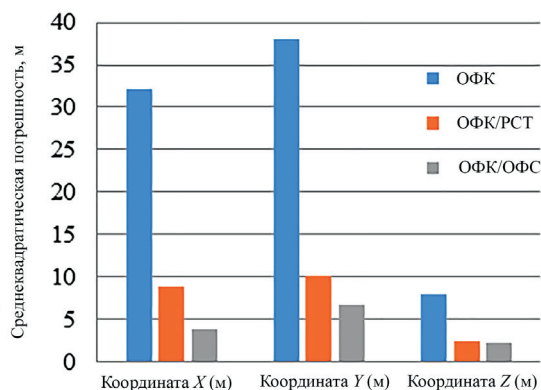


Рис. 11. СКП определения местоположения

Таблица 6

СКП определения местоположения

	X (м)	Y (м)	Z (м)	По сравнению с базовым ОФК			По сравнению с ОФК/РСТ		
Базовый ОФК	32,13	38,04	8,07						
ОФК/РСТ	8,82	10,17	2,39	+72,55%	+73,26%	+70,38%			
ОФК/ОФС	3,93	6,78	2,17	+87,77%	+82,18%	+73,11%	+55,44%	+33,33%	+9,21%

Результаты метода ОФК/ОФС, представленные в табл. 6, показывают улучшение точности определения местоположения в среднем на 81% по сравнению с результатами базового ОФК и примерно на 32% по сравнению с результатами ОФК/РСТ.

Еще одним преимуществом алгоритма ОФК/ОФС является сокращение времени его выполнения, что весьма важно для определения местоположения внутритрубного снаряда. В табл. 7 приведены сравнительные данные по времени выполнения трех алгоритмов, из которых видно, что, как и ожидалось, алгоритм ОФК/РСТ имеет наибольшую продолжительность выполнения из-за огромной размерности матриц. Вместе с тем, хотя результаты у алгоритма ОФК/ОФС лучше, чем у ОФК/РСТ, его продолжительность в конечном итоге на 4 с больше, чем у базового алгоритма ОФК. Это связано с необходимостью регулярного прерывания алгоритма ОФК и запуска алгоритма ОФС. Вся процедура выполнения алгоритма проводилась на ноутбуке с процессором Core i7 и оперативной памятью 8 Гб. Время запуска внутритрубного снаряда составило 44 412 с, то есть около 12 ч 20 мин.

Таблица 7

Время выполнения алгоритма

	ОФК	ОФК/РСТ	ОФК/ОФС
Время выполнения алгоритма (с)	28	70	32

Время выполнения алгоритма имеет огромное значение, особенно когда снаряд застревает в трубе между двумя опорными точками и перекрывает поток газа. В этом

случае необходимо немедленно установить его местоположение. Проанализировав соответствующие данные по каждой опорной точке с помощью всех трех методов (базовый ОФК, ОФК/РСТ и ОФК/ОФС), можно спрогнозировать местоположение снаряда на интервале до одного километра и более, поэтому для применения этого алгоритма время и точность имеют большое значение. Исследуемый магистральный трубопровод позволяет проанализировать ситуации застревания снаряда в трубе, что особенно актуально для подводных экспортных трубопроводов, в которых крайне важно быстро определить место застревания, поскольку задержка снаряда даже на одну секунду может привести к ущербу в размере нескольких миллионов долларов.

Результаты диагностики показали, что метод ОФК/ОФС успешно решает задачу определения местоположения внутритрубного снаряда по данным измерений МЭМС-датчиков. Этот метод обеспечивает точные данные для коррекции углов тангажа и рыскания в БИНС на каждом прямолинейном и изогнутом отрезке трубопровода. Кроме того, ожидается, что полученные результаты позволят значительно повысить точность системы диагностики трубопроводов с БИНС на основе МЭМС-датчиков, при этом существенно сокращаются как материальные затраты, так и время реализации алгоритма.

Выводы и перспективные направления исследований

В работе представлен метод точного определения местоположения внутритрубного диагностического снаряда с использованием инерциальных МЭМС-датчиков. Метод построен на интегрировании данных МЭМС-датчиков, опорных контрольных точек, одометров, а также результатов алгоритмов ОФК и ОФС. По сравнению с более ранними исследованиями в этой области [4, 14, 24] в предложенной навигационной системе снаряда, включающей алгоритмы ОФК/ОФС, вводится непрерывная коррекция погрешности определения углов тангажа и рыскания на каждом отрезке трубопровода, уменьшающая погрешность позиционирования снаряда. Алгоритм состоит из алгоритма ОФК для интегрирования дублирующихся и дополняющих друг друга измерений от ИИМ, одометра и опорных контрольных точек, а также алгоритма ОФС, действующего в качестве неголономного ограничения.

На основании проведенных исследований был сделан вывод о важности получения оптимизированного алгоритма для определения местоположения внутритрубного снаряда с высокой точностью и коротким временем выполнения. Определение местоположения снаряда является крайне важной задачей в условиях подводных трубопроводов, поскольку застревание в этих трубопроводах снаряда и его поиск могут привести к очень большому экономическому ущербу. Разумеется, аналогичные ситуации возникают и в наземных трубопроводах. Для решения этой проблемы ключевое значение имеют определение местоположения снаряда с высокой точностью и быстрый анализ данных, и именно на этих аспектах было сосредоточено внимание. Несмотря на то что для поиска застрявшего внутритрубного снаряда используется огромное количество различных электромеханических устройств, многие проблемы в этой области до сих пор не решены. В связи с этим создание высокоточной системы с малым временем выполнения алгоритма позволит передавать данные плана и профиля трубопровода с использованием точных трехмерных координат, и это будет способствовать решению задач в области применения внутритрубных снарядов.

Основным достоинством этой работы является повышение точности определения местоположения при меньших временных затратах по сравнению с предыдущими методами. Так, точность определения местоположения повысилась на 32% по сравнению с методом ОФК/РСТ. Кроме того, предложенный подход требует на 55% меньше времени на выполнение алгоритма по сравнению с методом ОФК/РСТ. Было также установлено, что введение неголономных ограничений не всегда повышает эффективность решения навигационной задачи, и это необходимо учитывать.

Еще одним «плюсом» является возможность применения различных методов в рассмотренных условиях существующего трубопровода протяженностью 111 км. Лабораторные исследования могут обеспечить высокую точность, однако при использовании полученных данных в реальных условиях желаемые результаты могут быть не достигнуты, тогда как предложенный подход позволяет решить эту задачу. Реальные условия, в которых находится внутритрубный снаряд, существенно отличаются от лабораторных. В настоящее время необходимо учитывать несколько факторов: отложения на внутренних стенках труб, деформации труб, резкие толчки. Кроме того, в действительности застревание снаряда в трубе требует более сложного решения с применением алгоритма коррекции по нулевой скорости (ZUPT).

Результаты проведенных экспериментов подтвердили приемлемую точность решения навигационной задачи и уменьшение максимальной погрешности определения местоположения примерно на 78%. В последующем возможно применение нескольких ИИМ на основе МЭМС-датчиков в сочетании с алгоритмом ОФК/ОФС для повышения точности определения местоположения. Кроме того, с помощью алгоритма на основе фильтра Калмана и ОФС вполне возможно получить результаты, сопоставимые с результатами ОФК/ОФС. Благодаря свойствам ОФК даже при большем количестве неголономных ограничений, близких к реальным измерениям, точность определения местоположения увеличивается, и дальнейшие исследования могут быть посвящены изучению и испытаниям устройств, установленных на внутритрубном снаряде, для измерения углов θ , ψ .

Доступ к данным

В исследовании частично или полностью использовались данные, предоставленные третьей стороной. Эти материалы могут быть доступны по прямому запросу в адрес правообладателей, указанных в разделе «Благодарность».

Благодарность

Данные для проведения этого исследования были предоставлены первым иранским предприятием по производству внутритрубных снарядов Segal Processing Engineering Company [25]. Оператором и собственником магистрального трубопровода, на котором проводились исследования, является Иранская газотранспортная компания (Iranian Gas Transmission Company, IGTC) [26].

ЛИТЕРАТУРА

1. Guan, L., Cong, X., Sun, Y., Gao, Y., Iqbal, U., and Noureldin, A., Enhanced MEMS SINS aided pipeline surveying system by pipeline junction detection in small diameter pipeline, *IFAC-PapersOn-Line*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 3560–3565.

2. **Murray, I. and Dawson, J.**, Evaluating pipeline integrity using ILI mapping data, *Proc. 9th Pipeline Technology Conference 2014*, Berlin, Germany, 2014.
3. **Guan, L., Gao, Y., Osman, A., Iqbal, U. and Noureldin, A.**, Analysis of rolling motion effect on SINS error modeling in PIG, *Proc. 2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 2016, pp. 681–686.
4. **Li, R., Cai, M., Shi, Y., Feng, Q. and Chen, P.**, Technologies and application of pipeline centerline and bending strain of In-line inspection based on inertial navigation, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2018, vol. 40, pp. 1554–1567.
5. **Santana, D.D.S., Maruyama, N. and Furukawa, C.M.**, Estimation of trajectories of pipeline PIGs using inertial measurements and non linear sensor fusion, *Proc. 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON*, 2010, pp. 1–6.
6. **Arribas, J., Moragrega, A., Fernández-Prades, C. and Closas, P.**, Low-cost GNSS/INS/Odometric sensor fusion platform for ground intelligent transportation systems, *Proc. 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017)*, Portland, Oregon, 2017, pp. 436–455.
7. **Jin, S. and Ping, Y.**, Research on the describing of trajectory for subsea pipeline based on inertial navigation system, *Proc. IEEE Power Engineering and Automation Conference*, 2011, pp. 463–468.
8. **Yadav, S.M., Shastri, S.K., Chakravarthi, G.B., Kumar, V., Rao, A.D. and Agrawal, V.K.**, A fast, parallel algorithm for fully overlapped Allan variance and total variance for analysis and modeling of noise in inertial sensors, *IEEE Sensors Letters*, 2018, vol. 2, pp. 1–4.
9. **El-Sheimy, N., Hou, H. and Niu, X.**, Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, vol. 57, pp. 140–149.
10. **Ghafil, H.N. and Jármai, K.**, Spatial representations, *Optimization for Robot Modelling with MATLAB*, Springer, 2020, pp. 55–68.
11. **Hou, H.**, Modeling inertial sensors errors using Allan variance, *Master of Science Thesis*, University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, Calgary, 2004.
12. **Barreda Pupo, L.**, Characterization of errors and noises in MEMS inertial sensors using Allan variance method, *Master of Science Thesis*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2016.
13. **Sahli, H.**, *MEMS-based aided inertial navigation system for small diameter pipelines*, PhD Thesis, University of Calgary, 2016.
14. **Sahli, H. and El-Sheimy, N.**, A novel method to enhance pipeline trajectory reconstruction using pipeline junctions, *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 567.
15. **El-Sheimy, N., Sahli, H. and Moussa, A.**, *Methods and systems to enhance pipeline trajectory reconstruction using pipeline junctions*, Patent of the US, no. US 2017/0138524 A1, 2017.
16. **Guan, L., Xu, X., Gao, Y., Liu, F., Rong, H., Wang, M. et al.**, *Micro-Inertial-Aided High-Precision Positioning Method for Small-Diameter PIG Navigation*, IntechOpen, 2018.
17. **Zhang, M., Li, K., Hu, B. and Meng, C.**, Comparison of Kalman filters for inertial integrated navigation, *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 6, p. 1426.
18. **Ji, M., Liu, J., Xu, X., Guo, Y. and Lu, Z.**, Improved pedestrian positioning with inertial sensor based on adaptive gradient descent and double-constrained extended Kalman filter, *Complexity*, 2020, vol. 2020, ID 4361812.
19. **IEEE Standard 952-1997**: Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros, *IEEE Standards Board*, 1998.
20. **Gonzalez, R., Giribet, J. and Patino, H.**, An approach to benchmarking of loosely coupled low-cost navigation systems, *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 272–287.
21. **Noureldin, A., Karamat, T.B. and Georgy, J.**, *Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-Based Positioning and Their Integration*, Springer Science & Business Media, 2012.
22. **Titterton, D.H. and Weston, J.L.**, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, 2nd Edition, Stevenage: Institution of Electrical Engineers, The American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
23. **Groves, P.D.**, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Artech House, 2013.
24. **Vavilova, N., Golovan, A., Kozlov, A., Nikitin, I., Panyov and A., Parusnikov, N.**, A navigation system of a pipeline inspection system for oil and gas pipelines: the results of the development and testing, *Proc. 22nd St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2015.
25. **www.segaltech.com.**
26. **www.nigtc.ir.**

Afshar, I.H., Delavar, M.R., and Moshiri, B. (College of Engineering, University of Tehran, Iran)
A Novel Constrained Filter Integrated with an Extended Kalman Filter in Underground Pipeline Navigation Using MEMS IMU, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, vol. 30, no. 1 (116), pp. 12–38.

Abstract. To produce a 3D map of the Tehran’s first gas transfer pipeline (Tehran—Kuhnamak), a methodology has been developed in this research, in which a strapdown inertial navigation system (SINS) based on micro-electro-mechanical system (MEMS) and inertial measurement unit (IMU) is applied on pipeline inspection gauges (PIGs) to sense data every 4 millimeters of 111 kilometers of the whole pipeline. The navigation solution is based on an extended Kalman filter (EKF) using Allan variance (AVAR) to analyze and tune the EKF initial inputs. A new constrained PIG filter (CPF) is proposed in this paper in integration with EKF, in which two Euler angles (pitch and yaw) of the PIG are updated due to non-holonomic state constraints between pipe junctions. Besides, 98 magnetic control points have been used to increase robustness about every kilometer, which is coordinated by GPS. Furthermore, odometer measurements have been employed as measurements in the EKF. The results show that using such a hybrid approach has improved the PIG positioning accuracy by about 81% compared with that of the Basic EKF. In addition, positioning accuracy in comparison with the latest methods like EKF/pipeline junctions (PLJ) has increased by 32%. Furthermore, the proposed method is 55% better than EKF/PLJ in the algorithm runtime.

Key words: EKF, odometer, navigation constraint, MEMS IMU, CPF, PLJ, SINS.

Материал поступил 25.08.2021