

Е. В. КАРШАКОВ, Б. В. ПАВЛОВ, М. Ю. ТХОРЕНКО, И. А. ПАПУША

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

В статье анализируются возможности развития навигационных систем летательных аппаратов с применением бортовых измерений параметров потенциальных физических полей Земли. При этом рассматриваются перспективные системы, которые не нашли пока широкого применения на практике: магнитогradientные, измеряющие gradient стационарного магнитного поля, гравигradientные, измеряющие gradient гравитационного поля, а также электромагнитные, измеряющие переменную составляющую магнитного поля. Описываются основные задачи, возникающие при измерениях данных параметров на борту летательного аппарата, приводится обзор алгоритмических и аппаратурных решений. Анализируются результаты бортовых измерений, даются оценки потенциальной точности навигации.

Ключевые слова: gradient магнитного поля, gradient гравитационного поля, электромагнитное поле, навигация по геофизическим полям, пространственное физическое поле.

Введение

Появление современных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), в первую очередь ГЛОНАСС и GPS, вывело на совершенно новый уровень возможности решения навигационных задач, в том числе для летательных аппаратов – как пилотируемых, так и беспилотных. Произошел гигантский скачок в развитии технологий в совершенно разных областях – от аэросъемочных работ до автоматической доставки грузов. Вместе с тем накопленный опыт применения ГНСС выявил не только очевидные преимущества, но и недостатки этой системы: зависимость от электромагнитной обстановки, возможность постановки радиопомех и создания ложных сигналов, позволяющих, в частности, захватывать управление подвижными объектами [1]. По этой причине вновь стали актуальны разработки автономных навигационных систем. При этом желательно, чтобы они были сопоставимы по точности с ГНСС.

Каршаков Евгений Владимирович. Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН» (Москва).

Павлов Борис Викторович. Доктор технических наук, главный научный сотрудник, ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН».

Тхоренко Максим Юрьевич. Кандидат технических наук, научный сотрудник, ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН».

Папуша Ирина Анатольевна. Кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН».

Статья по докладу на XXVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2020.

Классическое решение для автономной навигации – использование инерциальных навигационных систем (ИНС); в настоящее время, как правило, применяются их бесплатформенные варианты (БИНС). Такие системы, корректируемые по данным ГНСС, позволяют в значительной мере решить проблемы, связанные с неустойчивой работой спутниковых систем на ограниченном интервале времени [2–6]. При этом они по-прежнему характеризуются низкой помехоустойчивостью и сбоями в работе при выходе из строя хотя бы одного из сегментов ГНСС.

Другой возможный источник корректирующей информации – данные о координатно-привязанных параметрах различных геофизических полей, которые принято разделять на поверхностные, чьим источником является двумерная земная поверхность, и пространственные, имеющие трехмерную структуру [7]. К первым относятся радиолокационное изображение подстилающей поверхности и изображение в видимом или инфракрасном диапазонах, которые считаются нестабильными, а также рельеф земной поверхности. Ко вторым – магнитное (МПЗ) и гравитационное поле Земли (ГПЗ).

Навигационные системы по геофизическим полям в отечественной литературе известны также как корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС) [7–9], а в англоязычной – как системы, корректируемые по карте (map aided, или map matching) [10, 11]. Работа таких систем основана на минимизации некоторой функции, характеризующей отличие измеренных и считанных с цифровой карты значений параметров. Обычно рассматривается вариант, когда выполняется коррекция текущих показаний ИНС (БИНС) по невязке измеренных и предсказанных по данным цифровой модели с учетом данных ИНС (БИНС) параметров поля [12, 13]. Стоит отметить, что системы, измеряющие компоненты поля или его градиента, требуют наличия системы ориентации, определяющей направления осей чувствительности датчика соответствующих измерений. Это необходимо, поскольку цифровая модель задана в одной системе координат, связанной, например, с географической сеткой, а измерения компонент вектора поля или тензора его градиента выполняются в приборной системе координат, связанной с корпусом летательного аппарата. В связи с этим включение инерциального блока в измерительный комплекс вполне естественно.

Структура навигационной системы, корректируемой по геофизическим полям, обязательно содержит следующие элементы:

- блок измерения параметров геофизического поля;
- цифровую модель поля – источник эталонной информации;
- блок вычислителя.

При работе с поверхностными геофизическими полями уже достигнуты точности позиционного решения, вполне сопоставимые с точностью работы ГНСС. Это касается и систем, работающих по картам рельефа местности, и систем, использующих изображение подстилающей поверхности [7], хотя, конечно же, есть ряд оговорок. Главное, цифровая карта местности должна обладать характерными неоднородностями, наличие которых и определяет конечную точность решения. Основной недостаток использования поверхностных полей – невозможность работы над безориентирной местностью, например над морем. Здесь пространственные поля обладают явным преимуществом благодаря тому, что поле источников, расположенных под водой, может наблюдаться и в воздухе.

Тем не менее в силу ряда причин современные КЭНС, построенные на измерении параметров пространственных полей, пока существенно уступают по точности

ГНСС, как видно из таблицы [14]. Точность 20 м по МПЗ была получена при экспериментальных исследованиях навигационной системы, измеряющей модуль индукции магнитного поля квантовым датчиком с оптической накачкой [15]. В работе [14] наилучшая точность соответствующей КЭНС составляет 100 м.

Т а б л и ц а

Точность определения пространственных координат для различных навигационных систем [14, 15]

| Навигационные системы | Точность, м |
|-----------------------|-------------|
| ГНСС | 1–10 |
| КЭНС, рельеф | 30–50 |
| КЭНС, изображение | 5–30 |
| КЭНС, МПЗ | 20–500 |
| КЭНС, ГПЗ | 300–500 |

Приведенные параметры точности для КЭНС отвечают решению навигационных задач по цифровым картам поля. Точность решения модельных задач на основе аналитической усовершенствованной модели геомагнитного поля Enhanced Magnetic Model (ЕММ) с использованием феррозондов в качестве измерителя поля составила около 1000 м [16].

В данной работе исследуются возможности развития навигационных систем летательных аппаратов, построенных на основе измерений пространственных геофизических полей. При этом основной акцент делается на системах, которые в настоящее время являются наиболее актуальными при аэрогеофизических исследованиях. Это важно с точки зрения как повышения точности измерений, так и получения эталонной информации.

Если обратиться к современной практике аэрогеофизической съемки, то исследования в государственных масштабах во всем мире производятся с целью получения карт [17] аномалий МПЗ и ГПЗ, удельных электрических сопротивлений, естественного радиоактивного излучения. Для этой цели выполняются соответственно аэромагнитная и аэрогравиметрическая съемки, аэроэлектроразведка и аэрогамма-спектрометрия, осуществляемые, как правило, в комплексе. На рис. 1 представлен пример аэрогеофизического комплекса, использующего все современные методы измерения параметров физических полей.

При этом гамма-спектрометрия явно относится к полям поверхностного излучения – гамма-кванты, излучаемые при распаде естественных радиоактивных элементов, рассеиваются в первых 20-30 см плотной породы или воды [18], поэтому в работе будет уделено внимание аэромагнитным, аэрогравиметрическим и аэроэлектромагнитным или аэроэлектроразведочным системам.

Далее, в последующих разделах, эти системы бортовых измерений физических полей будут рассматриваться с точки зрения их применения для решения навигационных задач. Основные аспекты – доступность эталонной информации и возможности аппаратной реализации.



Рис. 1. Аэрогеофизический комплекс фирмы Sander Geophysics, включающий аэромагнитометрию, аэрогравиметрию, аэроэлектроразведку, аэрогамма-спектрометрию

Современные аэрогеофизические системы

А. Аэромагнитные системы

Аэромагнитные системы применяются для изучения магнитных свойств образующих приповерхностный слой пород. Классическими средствами бортовых измерений МПЗ являются [19]:

- трехкомпонентные датчики на основе феррозондов, измеряющие проекции вектора индукции МПЗ на ортогональные оси чувствительности;
- квантовые датчики с оптической накачкой, которые измеряют с высокой точностью модуль вектора индукции МПЗ.

Компоненты МПЗ измеряются феррозондовым датчиком с погрешностью на уровне 10 нТл при среднем значении поля 50000 нТл. Погрешность измерения модуля поля составляет около 0,1 нТл при чувствительности на уровне 0,5 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$, поэтому в отличие от навигационных задач [7, 16] при выполнении геомагнитного картирования применяются исключительно квантовые датчики [20]. При этом, как правило, на борту устанавливается несколько датчиков и по разнице в их измерениях получают представление о компонентах вектора градиента модуля индукции МПЗ [19].

Новые разработки сверхпроводящих квантовых интерферометров, работающих на эффекте Джозефсона (СКВИД), позволили создать системы, измеряющие компоненты полного тензора градиента магнитного поля с таким же уровнем чувствительности, что и системы с разнесенными квантовыми датчиками с оптической накачкой, – порядка 1 пТл/м/ $\sqrt{\text{Гц}}$ [21]. По утверждению У. Стасиновски [22], в ближайшие три года изме-

рения с тензорными градиентометрами в геофизике полностью заменят измерения модуля магнитной индукции, поскольку являются значительно более информативными и не уступают им ни по точности, ни по чувствительности.

Альтернативой технологии СКВИД, в настоящее время требующей охлаждения датчика жидким гелием до 4°K , может стать датчик на основе азото-замещенных вакансий в алмазе [23]. Компания Lockheed Martin уже представила опытный образец такого магнитного датчика, который измеряет компоненты вектора индукции [22]. Заявляемая достигнутая чувствительность в $15 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ позволяет надеяться на скорое появление нового высокочувствительного тензорного градиентометра. Говорить о векторном магнитометре подобной точности для мобильных применений не приходится – невозможно определить направления осей чувствительности с таким качеством.

Необходимо также отметить, что существуют разработки систем измерения параметров тензора градиента МПЗ на основе феррозондовых датчиков с использованием методов алгоритмической коррекции инструментальных погрешностей [24] или различного рода специальных устройств [25]. Заявленная погрешность измерения компонент тензора градиента – $0,5\text{-}1 \text{ нТл/м}$.

Б. Аэрогравиметрические системы

Аэрогравиметрические системы позволяют анализировать плотность пород. Для бортовых измерений ГПЗ традиционно применяются [19, 26]:

- скалярные гравиметры, установленные на горизонтируемой платформе и измеряющие вертикальную составляющую аномалии удельной силы тяжести;
- гравитационные градиентометры, измеряющие компоненты тензора градиента удельной силы тяжести.

Учитывая трудности, связанные с отделением ускорений носителя от аномалий удельной силы тяжести, даже при использовании высокоточной ГНСС, работающей в дифференциальном режиме и обеспечивающей погрешность позиционирования на уровне 1 см, интервал осреднения, на котором подавляются высокочастотные шумы ГНСС, составляет несколько километров при относительно невысоких скоростях носителя – порядка 100 м/с [26–28]. При этом приемлемая точность достигается только в режиме постобработки.

В 1996 году для высокоточной автономной навигации стратегических подводных лодок США в лаборатории Bell Aerospace был создан ротационный гравитационный градиентометр акселерометрического типа [29]. Приборной основой градиентометра служат четыре идентичных акселерометра, размещенных на периферии вращающегося диска. Каждая пара акселерометров имеет параллельные разнонаправленные оси чувствительности, расположенные по касательной к окружности. Выходной сигнал формируется из линейной комбинации показаний акселерометров, таким образом измеряются компоненты тензора гравитационного градиента. Вращение порождает вынужденные гармонические колебания, что вызывает модуляцию выходного сигнала двойной частотой вращения.

Самые успешные современные модели градиентометров – это две коммерческие системы, построенные на основе приборных блоков компании Lockheed Martin, усовершенствованной ротационную модель Bell Aerospace. Первая система – градиен-

тометр AGG (Airborne Gravity Gradiometer), вторая – FTG (Full Tensor Gradiometer), измеряющая полный тензор.

При соблюдении специальных условий полета (постоянная низкая высота порядка 100 м, турбулентность до 1 м/с^2) максимальное разрешение, которое удается стабильно получить в постобработке, составляет 200–300 м, что обусловлено скоростью и высотой полета самолета. Приборы имеют большие габариты и массу, сложны в эксплуатации. К достижениям последнего десятилетия относятся: значительное уменьшение шума (для прибора AGG шум стабильно не превышает $2 \text{ Этв}/\sqrt{\text{Гц}}$), совершенствование методов сбора, обработки и интерпретации данных, уменьшение размеров и массы приборов за счет использования малогабаритной цифровой электроники. По всей вероятности, ротационные градиентометры практически достигли пределов своих возможностей, и прибор нового поколения должен основываться на других физических принципах. Так, Lockheed Martin и CGG проводят совместный исследовательский проект FTGplus на основе конструкции с невращающимися акселерометрами с целью достигнуть 20-кратного улучшения чувствительности по сравнению с существующей системой [19].

Еще одна разработка, авторы которой ставят себе конечной целью интеграцию градиентометра и высокоточной инерциальной системы навигации PINS (Precision Inertial Navigation Systems), – атомный градиентометр Atomic Interferometer Gravity Gradiometer. Его разработчиком является компания AOSense, Inc (США). В этом устройстве используются волновые свойства ультрахолодных атомов (Нобелевские премии по физике 1997 и 2001 гг.), проявляющиеся при температурах ниже $10^{-6} \text{ }^\circ\text{K}$, и в качестве пробных масс выступают атомные частицы. Их траектория анализируется с помощью интерферометрических датчиков, излучающих криогенные лазерные импульсы. По данным двух сенсоров формируются выходные сигналы гравитационного градиента [30–32]. Дальнейшие исследования в проекте направлены на повышение точности системы и на уменьшение размеров прибора до карманного варианта на атомном чипе. Теоретически гравитационный градиентометр, построенный с использованием атомной интерферометрии, может достичь уровня шумовой составляющей $0,001 \text{ Этв}/\sqrt{\text{Гц}}$ с разрешающей способностью одного акселерометра 10^{-14} м/с^2 , но практически полученные характеристики еще слишком далеки от потенциальных возможностей.

В. Аэроэлектроразведочные системы

Аэроэлектроразведочные системы позволяют изучать распределение удельного электрического сопротивления пород. Из рассматриваемых здесь наиболее разнообразными являются, пожалуй, аэроэлектроразведочные системы, принцип работы которых основан на измерении в воздухе переменной составляющей магнитного поля. Среди них можно выделить [33]:

- активные системы, измеряющие поле отклика на возбуждение контролируемым дипольным источником переменного магнитного поля;
- пассивные системы, измеряющие переменную составляющую естественного МПЗ.

Несмотря на то что в геофизике принято разделять активные системы на работающие во временной и в частотной областях [33, 34], в данной работе нет смысла это учитывать, поскольку по существу отличия заключаются лишь в спектре излучаемо-

го сигнала. Системы, работающие во временной области, используют импульсное возбуждение, реализуя тем самым метод переходных процессов. В частотной области возбуждается полигармонический сигнал, и для каждой гармоники определяется расхождение измеренного и излученного сигнала по амплитуде и фазе.

В структуру активных систем обязательно входит один или несколько дипольных источников переменного поля, дипольный магнитный момент которых для разных систем составляет от 10^3 до 10^6 Ам² в частотном диапазоне от 10^5 до 10^1 Гц. Такое большое значение дипольного момента требуется, чтобы, во-первых, исключить влияние естественных вариаций МПЗ, а во-вторых, избежать влияния колебаний приемника переменного магнитного поля в постоянном поле Земли. В некотором смысле подобная система похожа на радиолокационную, но существенно более низкочастотную. Из-за дипольного характера излучения она имеет ограниченный радиус действия. Во всех современных аэроэлектроразведочных системах для измерения поля используется индуктивный приемник, уровень чувствительности которого меняется от единиц фТл на высоких частотах до единиц пТл на низких.

Источниками электромагнитного поля для пассивных систем являются естественные электромагнитные колебания в ионосфере, которые могут порождаться грозовой активностью или активностью Солнца. Главное свойство такого поля заключается в том, что оно преимущественно горизонтально. Пример спектра естественного электромагнитного поля показан на рис. 2 [35].

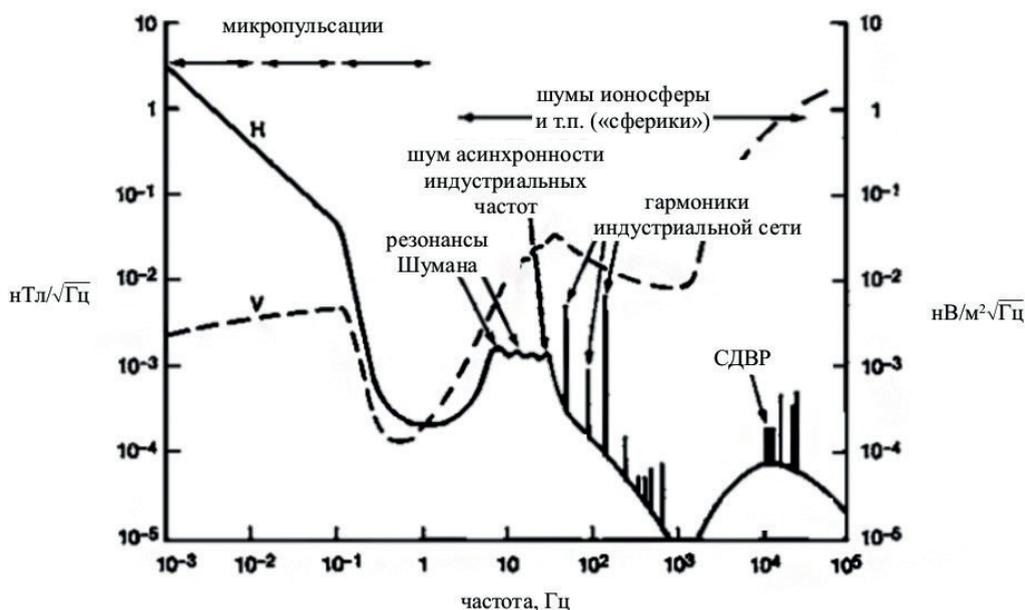


Рис. 2. Обобщенный спектр геомагнитного поля для его горизонтальной составляющей и для измерений наведенного напряжения: H (сплошная линия, нТл/√Гц) – спектр геомагнитного поля, V (пунктирная линия, нВ/м²√Гц) – измерения наведенного напряжения

Вертикальная компонента поля возникает тогда, когда в среде присутствует отличная от нуля удельная электрическая проводимость. Она и является полезным сигналом для таких систем. Поскольку вторичное поле обычно существенно мень-

ше первичного, внешнего по отношению к среде, то из рис. 2 становится понятно, что для пассивных систем требуется еще более чувствительный приемник, чем для активных. При этом для интерпретации измеренного сигнала необходимо измерять и горизонтальную составляющую поля, чтобы понимать, в ответ на какое поле пришел отклик. Необходимость учитывать все эти факторы в конструкции приемников таких систем приводит к увеличению их массогабаритных характеристик.

Для геофизической интерпретации в соответствии с разработанными методами так называемого аудиоманнитотеллурического зондирования при работе пассивных систем на земле устанавливаются дополнительно базовые станции для измерения компонент электрического поля [36]. Это позволяет избежать неоднозначности в решении обратной задачи. Вместе с тем если такая система будет использоваться для навигации, то решать обратную задачу не потребуется, поэтому и необходимость в базовой станции отпадет.

Для реализации как пассивных, так и активных систем также предложено использовать технологию СКВИД, которая может обеспечить чувствительность на уровне 1 фТл даже для достаточно низких частот [37].

Таким образом, можно констатировать, что развитие авиационных систем измерения пространственных геофизических полей сосредоточено в области создания новых магнитоградиентных, гравиградиентных и активных и пассивных электромагнитных систем, которые обеспечивают максимально детальные исследования физических свойств пород, образующих приповерхностную часть земной коры, – магнитной проницаемости, плотности и удельного электрического сопротивления – до глубин порядка 1 км. При этом благодаря ГНСС-технологиям детальность современной съемки параметров геофизических полей достигает масштаба 1:5000, т.е. 50 м между маршрутами [38]. Исключение составляет гравитационное поле [39], для которого масштаб аэросъемки не превышает 1:100 000, т.е. 1000 м между маршрутами. При гравиградиентных съемках сеть измерений сгущается до нескольких сотен метров между маршрутами.

Структура измерений пространственных геофизических полей

Пусть вектор навигационных параметров X включает трехмерный вектор позиционных координат r и трехмерный вектор угловой ориентации θ : $X = \{r, \theta\}$. Вектор измерений f можно представить в виде [40]

$$f = f_0(X) + f_a(X) + f_v(X, t) + f_c(\dots) + \Delta f(t). \quad (1)$$

Здесь $f_0(X)$ – это нормальная составляющая поля; $f_a(X)$ – аномальная составляющая поля, основная для высокоточной навигации; $f_v(X, t)$ – вариационная составляющая поля, модель которой неизвестна; $f_c(\dots)$ – наведенная со стороны авиационного носителя помеха; $\Delta f(t)$ – шум измерений; t – время.

Нормальная составляющая поля описывается известными аналитическими соотношениями:

- для аэромагнитных систем используется международная модель геомагнитного поля IGRF (International Geomagnetic Reference Field), задающая разложение скалярного потенциала МПЗ по сферическим функциям [41];

- для аэрогравиметрических систем может использоваться модель гравитационного потенциала EGM2008 (Earth Gravitational Model), готовится к изданию EGM2020 [42], задающая разложение скалярного потенциала ГПЗ по сферическим функциям;
- для активных электроразведочных систем нормальное поле задается формулой поля точечного диполя или поля витка с током [43];
- для пассивных систем используется гипотеза, что измеренная горизонтальная составляющая является внешним полем, т.е. его нормальной составляющей.

Аномальная составляющая, как правило, не имеет аналитического описания. Исключением может быть представление гравитационной аномалии как вейвлет-разложения [44]. В общем же случае при применении в навигационных комплексах аномальное поле хранится в виде матрицы значений, заданных на горизонтальной поверхности. Поле выше этой поверхности вычисляется аналитически по ходу работы навигационной системы [14]. Стоит отметить, что для систем на переменном магнитном поле можно пересчитывать компоненты поля, используя распределение удельных электрических сопротивлений [45].

Вариационная составляющая в силу ее глобального характера пренебрежимо мала как для гравитационного, так и для магнитного поля в случае измерения градиента. Конечно же, для измерений самого вектора или модуля МПЗ пренебрегать вариациями нельзя. Для активных электроразведочных систем амплитуда сигнала источника поля выбирается достаточно большой, чтобы пренебречь вариациями. Для пассивных систем вариации по сути являются нормальной составляющей поля.

Наведенная составляющая поля представляет большую проблему и может в конечном итоге повлиять на точность навигационного решения. Для аэромагнитных систем существует модель Лелиака [46], которая учитывает постоянную, индуктивную и вихревую составляющие наведенного магнитного поля. Данная модель была доработана для определения наведенной составляющей при измерении компонент тензора градиента МПЗ [47]. Важно отметить, что она является результатом линейного приближения, поэтому точность учета наведенной составляющей связана с ее величиной, точнее, с отношением ее к нормальной составляющей поля. Дополнительно надо учитывать поле бортового электрооборудования [7].

В гравиметрических системах серьезные затруднения вызывает учет ускорений аппарата-носителя, отчасти устранить их позволяет применение разностных градиентометрических систем. В них используются показания одинаковых разнесенных в пространстве датчиков, на которые при движении действует одинаковое переносное ускорение. Относительное и кориолисово ускорения могут быть вычислены с использованием показаний гириноерциального блока. Тем не менее на выходной сигнал гравитационного градиентометра, помимо собственно градиента поля, высоты, скорости и направления полета, воздействуют и компенсационные члены, формируемые по данным ИНС, а значит, и погрешности ИНС [7].

В активных и пассивных электроразведочных системах также надо учитывать поле токов, наведенных в фюзеляже летательного аппарата. Для компенсации этого влияния в активных системах существует и применяется методика, представляющая поле носителя в виде линейной комбинации векторов поля контролируемых диполей [48]. Она позволяет компенсировать влияние до уровня инструментальных погрешностей. Для пассивных систем проблема наведенного поля не решена. Все

низкочастотные пассивные системы используют приемники, буксируемые на тросе длиной около 100 м.

Шум измерений – это инструментальные погрешности датчиков поля.

Алгоритмы решения навигационной задачи

В некоторых публикациях используются измерения градиента магнитного поля для решения навигационной задачи. Так, в [49] описывается применение градиентометра для определения углов ориентации объекта относительно МПЗ. Отмечается, что в отличие от измерений вектора поля компоненты тензора дают представление обо всех углах ориентации. Авторы работы [50] предлагают использовать различные инварианты тензора градиента и самого магнитного поля, чтобы по их комбинации попытаться определить координаты подвижного объекта. В [13] предлагается выполнять коррекцию БИНС по измерениям параметров градиента МПЗ. Уравнения измерений линеаризуются в окрестности текущего решения и оценка погрешности вырабатываемых координат осуществляется с использованием фильтра Калмана.

Идея навигации по измерениям градиента ГПЗ была описана в [51, 52] в конце прошлого века как задача коррекции ИНС по невязкам измерений параметров градиента с использованием фильтра Калмана. В [53] предлагается использовать нейронные сети для оценки погрешностей ИНС по невязкам измерений тензора градиента. В [54] отмечается, что применение градиентометров на холодных атомах, точность которых ожидается на уровне долей Эв, потенциально значительно повышает точность навигационного решения, вырабатываемого ИНС.

Задача навигации по измерениям параметров переменного магнитного поля пока не получила своего развития. В работе [55] лишь предложено использовать карты удельных сопротивлений как навигационную информацию.

Предполагая, что поле носителя скомпенсировано, уравнения измерений запишем в следующем виде:

$$Z = f_a(X) + \Delta f(t). \quad (2)$$

При этом в общем случае вектор X включает не только навигационные параметры, но и параметры погрешностей инерциальной навигационной системы.

Аналитической записи функции $f_a(X)$ не существует, она задана в виде цифровых карт на некоторой поверхности, которые могут быть аналитически пересчитаны в верхнюю полуплоскость [14]. Необходимо из всех возможных гипотез о текущих координатах X выбрать наиболее достоверную, которая и станет решением навигационной задачи. Для ее решения широко применяется байесовский подход [7, 10, 12]. В рамках этого подхода алгоритм решения задачи навигации может быть сведен к соотношениям фильтра Калмана, если использовать приближенное линеаризованное представление уравнений измерений (2) в окрестности априорной оценки координат. Для этой цели вычисляются матрицы частных производных функции $f_a(X)$.

Согласно работе [56], современные тенденции развития алгоритмической составляющей КЭНС можно грубо отнести к двум направлениям:

- КЭНС, применяющие алгоритмы калмановского типа – обобщенный, итерационный, ансцентный фильтр Калмана и другие;

- КЭНС, применяющие различные модификации метода Монте-Карло, например фильтр частиц.

Более подробная классификация алгоритмов КЭНС дана в [57], где в частности отмечается, что в большинстве алгоритмов перед использованием измерений поля для коррекции показаний навигационной системы осуществляется их предварительная обработка. А в [58] предложен алгоритм, в котором предварительная обработка не предусмотрена и оценивание поля при решении задачи навигации из рассмотрения исключается, что создает хорошие перспективы ее эффективного решения при движении объектов, в том числе с высокими скоростями.

Как было сказано выше, системы измерения градиента магнитного или гравитационного поля, как и система измерений параметров переменного магнитного поля, должны содержать инерциальный измерительный блок для определения направлений осей чувствительности датчика, поэтому задачу навигации разумно решать путем комплексирования описанных выше систем с ИНС. В этом случае саму навигационную задачу можно решать как задачу коррекции ИНС по измерениям параметров физических полей [12, 13]. Если же оценка погрешности априорной информации о координатах сопоставима или превышает радиус корреляции поля, применение алгоритмов калмановского типа ограничено.

В линеаризованные уравнения измерений, которые формируются для невязок измеренных и полученных с использованием карты параметров f_a , войдут, с одной стороны, погрешности текущего определения пространственных координат Δx , а с другой – малые углы погрешности определения текущей ориентации β :

$$z_j = H_j x_j + \Delta f_j, x = (\Delta x, \dots, \beta, \dots).$$

При этом погрешности координат будут с коэффициентами, полученными после взятия пространственных частных производных от соответствующих параметров поля, погрешности ориентации – с коэффициентами, полученными по самим параметрам геофизического поля:

$$H_j = (\partial f_a(X_j)/\partial X, \dots, f_a(X_j), \dots).$$

Более подробные уравнения для параметров МПЗ приведены в работах [13, 59]. Уравнения измерения переменного магнитного поля будут точно такими же.

В случае измерений градиента ГПЗ с использованием ротационных градиентометров уравнения будут более сложными, поскольку в их состав войдут компенсационные члены, необходимые для формирования параметров градиента, которые содержат погрешности координат, скорости и ориентации ИНС [7].

Эталонная информация

А. Карты аномального магнитного поля

По данным, опубликованным в [14], на 75% земной поверхности в северном полушарии и на 45% в южном имеются карты МПЗ, которые позволяют достичь погрешности навигации в 100-500 м. В [7] приводятся интервалы корреляции аномального магнитного поля для различных районов, которые меняются от 7 км на

100-метровой высоте до 9 км на высоте 1000 м над сушей и от 11 до 14 км над Черным морем.

Как было сказано выше, объем данных непрерывно увеличивается, а точность привязки данных о МПЗ возрастает за счет применения ГНСС при выполнении съемок. При этом основным измеряемым параметром в настоящее время является величина модуля вектора индукции МПЗ [17, 20]. О начале повсеместного применения измерений тензора градиента МПЗ говорить еще рано, однако можно воспользоваться уже имеющейся информацией. Так, в работе [60] предложена методика преобразования карты модуля индукции к компонентам тензора градиента магнитного поля. Погрешность преобразования составляет около 5%.

Интервал корреляции горизонтального градиента модуля индукции МПЗ, измеренного на высоте 70 м для одного из участков суши в Восточной Сибири, составил 650 м (рис. 3). Оценка потенциальной погрешности навигации по этим данным, рассчитанная в соответствии с [61], дает около 2 м. Она получена из соотношения среднего значения градиента навигационного поля 7 пТл/м² и суммарных шумов, предполагаемых на уровне 10 пТл/м.

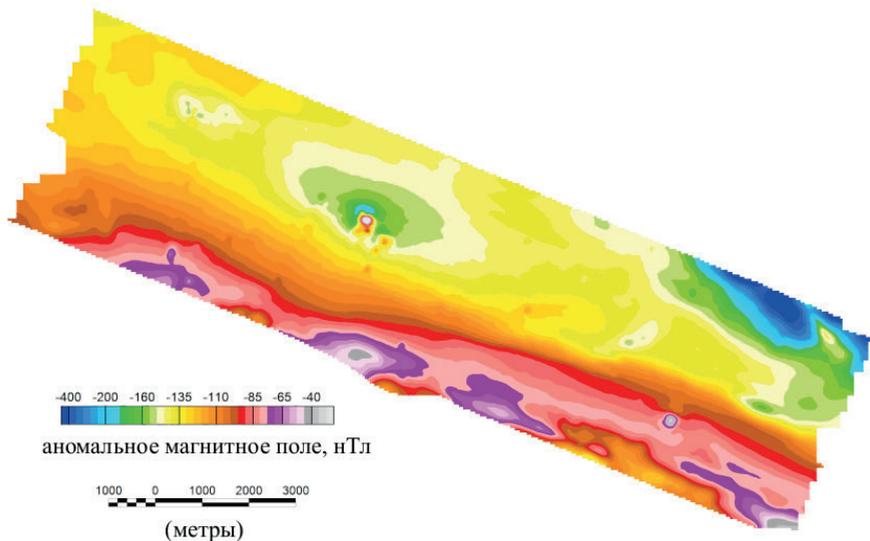


Рис. 3. Карта аномального магнитного поля, Восточная Сибирь. Интервал корреляции – 650 м

В [59] приведена оценка точности навигации по измерениям параметров градиента магнитного поля по результатам моделирования. На высоте полета 100 м при комплексировании измерителей параметров аномального МПЗ с БИНС навигационного и тактического класса точности достигнута погрешность коррекции порядка 10-30 см при условии, что градиент измеряется СКВИД-системой погрешности 1 пТл/м, и порядка 10-30 м при измерениях градиентометром на феррозондовых датчиках, который на 2-3 порядка грубее. Это означает, что даже при использовании карты градиента магнитного поля, синтезированной на основании модуля магнитной индукции, погрешность навигации может быть не более 10 м.

Можно также отметить положительные перспективы применения системы измерения градиента модуля индукции магнитного поля. При моделировании комплек-

сирования такого измерителя с БИНС навигационного класса точности получена субметровая погрешность навигации, с БИНС тактического класса – около 3 м. Кроме того, на практике погрешность навигации по измерениям модуля индукции при комплексировании с ИНС навигационного класса точности без доступной информации о вариациях МПЗ составила около 20 м [15].

Б. Карты аномального гравитационного поля

По данным, опубликованным в [14], на 90% земной поверхности имеются карты ГПЗ, которые могли бы позволить достичь точности навигации 300-500 м. Данная погрешность, однако, не учитывает сложности измерения параметров гравитационного поля на борту летательного аппарата. Значительная часть этих данных получена на основе спутниковых съемок. Из-за некорректности аналитического пересчета значений поля вниз высокочастотная составляющая аномального поля в имеющихся картах не представлена.

В настоящее время ведутся аэросъемочные работы с помощью гравитационных градиентометров [19]. Интервал корреляции по данным такой съемки на средней высоте около 80 м для одного из регионов в штате Миссури, США, составил около 2100 м по каналу вертикального градиента вертикальной компоненты [62] (рис. 4). При этом по результатам таких съемок вряд ли можно сформировать базы навигационных карт, поскольку пока их выполняется очень мало.

Согласно оценке, потенциальная погрешность навигации по этим же данным, рассчитанная в соответствии с [61], составит 17 м. Она получена из соотношения среднего значения градиента навигационного поля 0,12 ЭТВ/м и суммарных шумов, предполагаемых на уровне 2 ЭТВ. Стоит, однако, иметь в виду, что эти значения формально получены из данных, которые были подвергнуты фильтрации на интервале 200-300 м.

В работе [63] предложен способ расчета аномального ГПЗ и его градиента по картам рельефа местности. По мнению авторов, достигнуто достаточно точное совпадение измеренных значений компонент тензора градиента и вычисленных по рельефу. При этом необходимо помнить, что метод не учитывает неоднородности в распределении плотности, что ограничивает точность полученных карт.

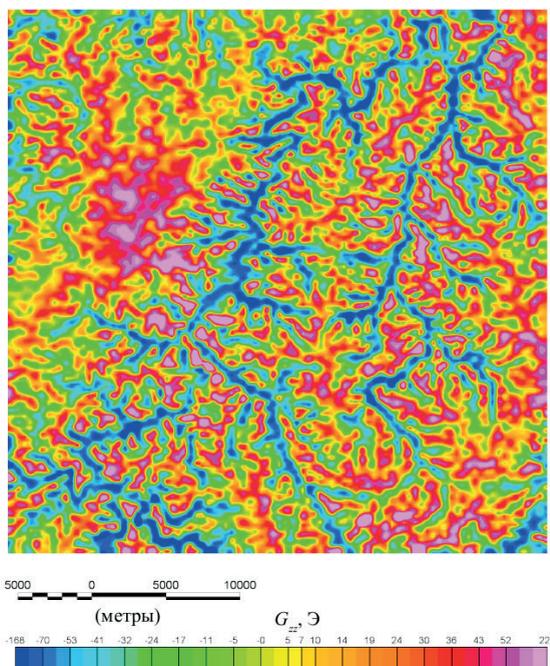


Рис. 4. Карта вертикального градиента вертикальной компоненты гравитационного поля, штат Миссури, США. Интервал корреляции – 2100 м

В. Карты удельных электрических сопротивлений

Поскольку системы, измеряющие переменное магнитное поле, широко не рассматривались как навигационные, не существует обширных баз данных по распределению удельных электрических сопротивлений. Тем не менее, несмотря на достаточно большое разнообразие электроразведочных систем [33], сопоставление их данных показывает, что они эквивалентны при переходе к параметрам удельных электрических сопротивлений [38]. При этом проводятся глобальные аэроэлектроразведочные исследования в Австралии [64], Америке [65], Европе [66] и Африке [67].

Интервал корреляции поля удельных электрических сопротивлений, измеренных на высоте 70 м на частоте возбуждения 230 Гц для одного из участков суши в Восточной Сибири, составил 1600 м (рис. 5). Компоненты поля по таким картам могут быть получены при решении прямой задачи для конкретной измерительной системы [45]. Согласно оценке, потенциальная погрешность навигации по этим же данным, рассчитанная в соответствии с [61], составляет около 20 м при соотношении среднего значения градиента навигационного поля $0,006 \ln(\text{Ом} \cdot \text{м})/\text{м}$ и измерительных шумов, оцениваемых в 10^{-5} в долях первичного поля, что приводит к шуму $0,025 \ln(\text{Ом} \cdot \text{м})$ для логарифма удельного электрического сопротивления.

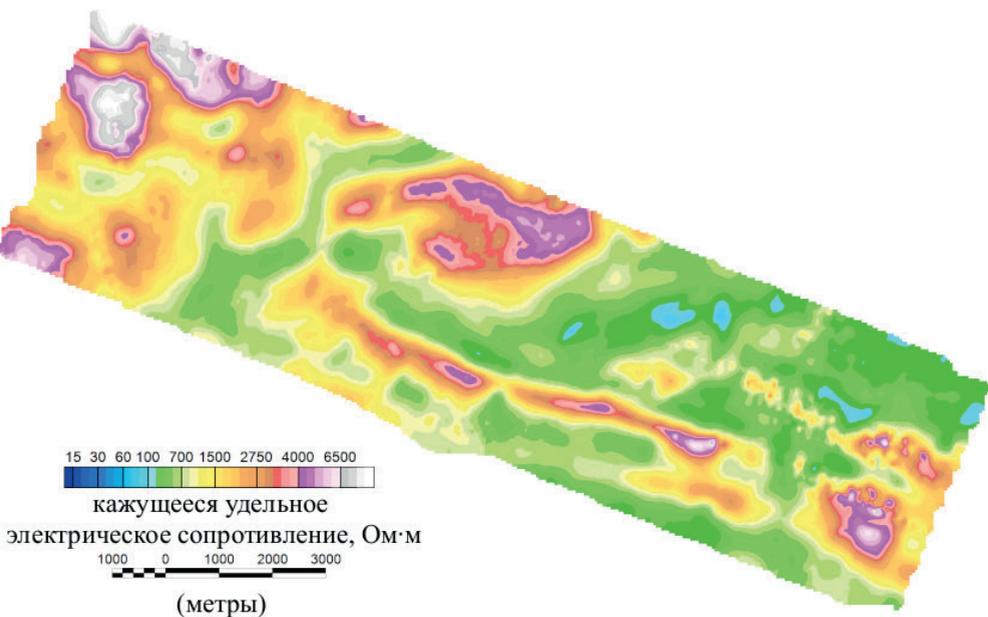


Рис. 5. Карта удельных электрических сопротивлений, Восточная Сибирь.
 Интервал корреляции – 1600 м

Над морской поверхностью такие системы теряют свою эффективность, если толщина воды превышает 10 м, поскольку соленая морская вода является хорошим проводником электричества и все аномальное поле будет обусловлено токами в воде. В этом смысле системы на переменном магнитном поле проигрывают другим системам на пространственных физических полях.

Вопросы реализации перспективных навигационных систем по пространственным геофизическим полям

А. Навигация по измерениям градиента магнитного поля

Для нормальной составляющей поля величина градиента небольшая – около 20 пТл/м. Аномальное поле может давать до 10 нТл/м при высоте полета 50-100 м. При погрешности современных градиентометров на уровне 10 пТл/м задача навигации вполне решаема. Учитывая, что отношение погрешности измерителя к величине градиента достигает 10^{-3} , система вполне работоспособна и сможет обеспечивать не только позиционную, но и угловую коррекцию, если вектор оцениваемых параметров в задаче коррекции ИНС содержит погрешности ориентации, как было показано в работах [13, 59].

Заявленная точность достигается с помощью как систем, измеряющих вектор градиента модуля индукции МПЗ, построенных на разнесенных скалярных датчиках поля с оптической накачкой [68], так и тензорных градиентометров на СКВИД-датчиках [37]. Важно отметить, что измерения компонент вектора градиента могут быть получены при пространственном разнесении датчиков на расстояние порядка 10 м.

Важное преимущество магнитоградиентных систем – их быстродействие. Для квантовых скалярных датчиков измеритель поля может выдавать до 1000 независимых измерений в секунду с заявленной точностью и чувствительностью. Перспективные векторные датчики, как и СКВИД-датчики, обеспечивают еще большую частоту регистрации данных.

Б. Навигация по измерениям градиента гравитационного поля

Для нормального поля на поверхности уложенного эллипсоида величина гравитационного градиента составляет максимум 3000 Этв [69]. Градиенты силы тяжести, измеренные у поверхности Земли, могут существенно отличаться от величины нормальной составляющей из-за локальных неоднородностей земной коры. На равнинных территориях аномалии градиентов достигают десятков Этв, в горных местностях – сотен Этв, аномалии вертикальной компоненты U_{zz} могут превышать 1000 Этв. С ростом высоты величина полезного сигнала значительно уменьшается. Традиционно считается, что погрешность измерения компонент тензора градиента ГПЗ для осуществления навигационной коррекции летательного аппарата не должна быть более 1 Этв при разрешении до сотни метров. Очевидно, что при этом обеспечивается точность измерения углов ориентации до 10^{-4} .

Применяемые на практике бортовые гравитационные градиентометры состоят из одного вращающегося диска диаметром около 30 см с семью равноудаленными акселерометрами, оси чувствительности которых направлены по касательной к окружности [29, 30]. Диск монтируется на высокоточной инерциальной горизонтируемой платформе, его вращение осуществляется вокруг почти вертикальной оси. В этой конфигурации прибор обеспечивает более низкие шумовые составляющие, чем системы с большим наклоном оси вращения, особенно в условиях турбулентности. Градиентометр полного тензора содержит три одинаковых вращающихся диска диаметром 15 см с четырьмя акселерометрами на каждом. Оси вращения дисков оди-

наково наклонены относительно вертикали, что позволяет определять на подвижном основании все компоненты тензора гравитационного градиента. Обе системы достаточно массивны, поскольку требуют стабилизации относительно вертикали.

Заявленная точность в настоящее время достигается только в постобработке с использованием данных ГНСС при соблюдении специальных условий полета, поэтому перспективы реализации таких систем могут быть связаны только с появлением новых разработок. [19, 30, 32]. При этом остается открытым вопрос создания базы данных эталонной информации, которая может быть получена только в процессе наземных, морских и аэросъемок соответствующей детальности и точности привязки.

В. Навигация по измерениям переменного магнитного поля

Величина аномального поля для активных систем может составлять от 10^{-6} до 10^{-1} по отношению к нормальной составляющей – первичному возбужденному полю. Соответственно, обеспечивается чувствительность электроразведочных систем на уровне 10^{-5} – 10^{-6} . При этом чем ближе приемник к передатчику, тем точнее требуется измерять поле, если измерять его непрерывно. При импульсном возбуждении можно ограничиться измерением отклика только при выключенном поле возбуждения. Это позволяет дополнительно повысить чувствительность системы даже при совмещенных передатчике и приемнике. Интервал осреднения для активных систем, как правило, около секунды.

Для пассивных систем чувствительность должна быть на уровне фТл и меньше, что составляет 10^{-2} – 10^{-3} от величины нормальной составляющей поля (см. рис. 2). Интервал осреднения для таких систем – до 10 с.

Конструктивно современные активные электроразведочные системы достаточно громоздки, что обусловлено стремлением повысить их чувствительность [33]. Тем не менее есть и достаточно компактные варианты, работающие обычно на фиксированном небольшом наборе гармонических сигналов от 10^2 до 10^4 Гц. Такие системы устанавливаются в том числе и на фюзеляже летательного аппарата, как в системе SGFEM компании Sander Geophysics (см. рис. 1).

Пассивные системы, будучи достаточно низкочастотными (от 30 Гц), также громоздки и могут применяться только на длинном буксировочном тросе, чтобы избежать электромагнитных влияний носителя. Есть, однако, высокочастотный вариант СДВР (сверхдлинноволновый радиокип, в англоязычной литературе – Very Low Frequency, VLF), работающий на частотах порядка 10^4 Гц, используемых радиостанциями дальней связи. Такие системы могут устанавливаться прямо на фюзеляже и обеспечивать измерения удельных электрических сопротивлений в верхней части разреза – до 100 м глубины [33]. Из-за малой глубинности эти системы не очень активно применяются в геофизике, но могут найти применение в навигации благодаря своей компактности и низкому энергопотреблению. Учитывая, что частоты этого диапазона присутствуют в спектре естественного поля (рис. 2), можно надеяться на появление компактной пассивной электроразведочной системы, не зависящей от работы радиостанций.

Проблемы с эталонной информацией здесь гораздо глубже, чем в случае магнитогradientных систем. Во-первых, нет глобальных баз данных по распределению удельных электрических сопротивлений. Во-вторых, работоспособность навига-

ционных систем по переменному магнитному полю может быть обеспечена только над сушей или мелководьем, поскольку отклик над морской поверхностью приходит только от воды, глубина проникновения электромагнитного поля в морской воде составляет 1–10 м в зависимости от частоты сигнала и солености воды.

Заключение

Рассмотренные геофизические системы: магнитоградиентные, гравиградиентные, активные и пассивные электромагнитные – теоретически могут использоваться для задач навигации летательных аппаратов. Справедливо утверждение, что потенциальная точность для магнитоградиентных и активных электромагнитных систем сопоставима с точностью ГНСС и зависит от качества эталонной информации. Пассивные электромагнитные системы будут на порядок грубее, поскольку требуют большего интервала осреднения из-за низкого уровня полезного сигнала. По той же причине более грубыми будут и гравиградиентные системы, интервал осреднения для самых лучших из которых составляет 3-5 с [62] (200-300 м при скорости ЛА 60 м/с).

Учитывая, что электромагнитные системы не будут работать над морем из-за быстрого затухания переменного магнитного поля в соленой воде в силу высокой удельной электропроводности, наиболее перспективными в настоящее время представляются навигационные системы, работающие по измерениям градиента магнитного поля. Современное развитие магнитоградиентной аппаратуры позволяет уже создавать и испытывать экспериментальные образцы интегрированных навигационных систем. Необходимо, чтобы получение эталонной информации по магнитному полю осуществлялось с учетом перспективы применения таких средств навигации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gaspar, J., Ferreira, R., Sebastião, P., Souto, N.**, Capture of UAVs through GPS spoofing, *Proceedings of the 6th Global Wireless Summit 2018 (GWS-2018)*, 2018, pp. 21–26.
2. **Емельянец Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. 394 с.
3. **Groves, P.D.**, Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, 2nd ed. Artech House, Boston and London, 2013. 800 p.
4. **Аль Битар Н., Гаврилов А.И., Халаф В.** Методы на основе искусственного интеллекта для повышения точности интегрированной навигационной системы при отсутствии сигнала ГНСС. Аналитический обзор // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. № 4(107). С. 3–28.
5. **Аль Битар Н., Гаврилов А.И.** Сравнительный анализ алгоритмов комплексования в слабосвязанной инерциально-спутниковой системе на основе обработки реальных данных // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. № 3(106). С. 31–52.
6. **Калаф В., Чоуэйб И., Вайнах М.** Новый адаптивный ансамбльный фильтр Калмана для несвязанной инерциально-спутниковой навигационной системы // Гироскопия и навигация. 2017. Т. 25. № 2(97). С. 35–51.
7. **Джанджгава Г.И., Августов Л.И.** Навигация по геополям. Научно-методические материалы. М: Научтехлит, 2018. 296 с.
8. **Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П.** Основы навигации по геофизическим полям. М.: Наука, 1985. 328 с.
9. **Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П.** Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. М.: Наука, 1979. 447 с.
10. **Bergman, N.**, *Recursive Bayesian estimation: Navigation and tracking applications*, Sweden: Linköping University, 1999. 204 p.

11. **Vaman, D.**, TRN history, trends and the unused potential, *31st Digital Avionics Systems Conference (DASC), IEEE*, 2012, pp. 1A3-1–1A3-16.
12. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 370 с.
13. **Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю., Павлов Б.В.** Аэромагнитная градиентометрия и ее применение в навигации // Проблемы управления. 2016. № 2. С. 72–80.
14. **Сазонова Т.В., Шелагурова М.С.** Геоинформация в комплексах бортового оборудования летательных аппаратов. М: Научтехлит, 2018. 148 с.
15. **Sanctiani, A., Raquet, J.**, Airborne magnetic anomaly navigation, *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, 2017, vol. 53, issue 1, pp. 67–80.
16. **Вязьмин В.С., Голован А.А., Папуша И.А., Попеленский М.Ю.** Информативность измерений векторного магнитометра и глобальных моделей магнитного поля Земли для коррекции БИНС летательного аппарата // XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, сборник материалов, СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 340–344.
17. **Бабаянц П.С.** Аэрогеофизические технологии — эффективное средство оптимизации геолого-разведочного процесса // Разведка и охрана недр, 2015. №12. С. 25–33.
18. **Бабаянц П.С., Керцман В.М., Левин Ф.Д., Трусов А.А.** Особенности современной аэрогамма-спектрометрии // Разведка и охрана недр. 2015. № 12. С. 10–16.
19. **Fairhead, J.D., Cooper, G.R.J., Sander, S.**, Advances in airborne gravity and magnetics, *Proceedings of Exploration 17: 6th Decentral International Conference on Mineral Exploration*, edited by V. Tschirhart and M.D. Thomas, 2017, pp. 113–127.
20. **Минлигареев В.Т., Сазонова Т.В., Арутюнян Д.А., Трегубов В.В., Хотенко Е.Н.** Геофизическое обеспечение перспективных автономных магнитометрических навигационных систем // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 4 (111). С. 95–105.
21. **Stolz, R., Zakosarenko, V., Schulz, M., Chwala, A., Fritsch, L., Meyer, H.G., Köstlin, E.O.**, Magnetic full-tensor SQUID gradiometer system for geophysical applications, *Leading Edge*, 2006, 25, pp. 178–180.
22. **Stasinowsky, W.**, Tensor and vector magnetic advances: The latest software and hardware and what it means for exploration, *Geophysics: New proven advances and applications in exploration geophysics*, Prospectors and Developers Association of Canada Convention, 2020.
23. **Karin, T., Dunham, S., Fu, S.**, Alignment of the diamond nitrogen vacancy center by strain engineering, *Applied Physics Letters*, 2014, May, pp. 1–4.
24. **Sui, Y., Miao, H., Wang, Y., Luan, H., Lin, J.**, Correction of a towed airborne fluxgate magnetic tensor gradiometer, *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 2016, vol. 13, no. 12, pp. 1837–1841.
25. **Sui, Y., Li, G., Wang, S., Lin, J.**, Compact fluxgate magnetic full-tensor gradiometer with spherical feedback coil, *Review of scientific instruments*, 2014, 85, 014701, pp. 1–7.
26. **Пешехонов В.Г., Степанов О.А. и др.** Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли. СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
27. **Соколов А.В., Краснов А.А., Алексеенко А.С., Стусь Ю.Ф., Назаров Е.О., Сизиков И.С.** Опыт измерения абсолютного значения силы тяжести на подвижном основании // Гироскопия и навигация. 2017. №2(97). С. 77–88.
28. **Пешехонов В.Г., Соколов А.В., Железняк Л.К., Береза А.Д., Краснов А.А.** Вклад навигационных технологий в создание мобильных гравиметров // Гироскопия и навигация, 2019. Том 27. №4. С. 162–180.
29. **Hofmeyer, G.M., Affleck, C.A.** Rotating accelerometer gradiometer: *US Patent 5,357,802*, 1994.
30. **Евстифеев М.И.** Состояние разработок бортовых гравитационных градиентометров // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. № 3(94). С. 96–114.
31. **Евстифеев М.И.** Динамика бортовых гравитационных градиентометров // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. №3 (106). С. 69–87.
32. **Соседко Д.Н.** Обзор состояния разработок наземных и космических атомных гравитационных градиентометров // Материалы III Научно-практической конференции «Метрология в XXI веке». ФГУП ВНИИФТРИ. 2015. С. 179–190.
33. **Legault, J.M.**, Airborne electromagnetic systems – state of the art and future directions, *CSEG Recorder*, 2015, June, pp. 38–49.
34. **Тригубович Г.М., Шевчук С.О., Косарев Н.С., Никитин В.Н.** Комплексная технология навигационного и геодезического обеспечения аэроэлектромагнитных исследований // Гироскопия и навигация. 2017. №1 (96). С. 93–107.

35. Spies, B.R., Frischknecht, F.C. Electromagnetic sounding, *Electromagnetic methods in applied geophysics*, vol. 2: Applications, ed. M. N. Nabighian, 2008, pp. 285–425.
36. Bagrianski, A., Kuzmin, P., Prikhodko, A., AFMAG evolution – expanding limits, *Extended abstracts of 16th SAGA biennial conference and exhibition*, 2019, pp. 1–4.
37. Chwala, A., Kingman, J., Stolz, R., Schmelz, M., Zakosarenko, V., Linzen, S., Bauer, F., Starkloff, M., Meyer, M., Meyer, H.-G., Noise characterization of highly sensitive SQUID magnetometer systems in unshielded environments, *Superconductor Science and Technology*, 2013, 26, pp. 1–5.
38. Феликс Ж.Т., Каршаков Е.В., Мельников П.В., Ванчугов В.А. Результаты сопоставления данных аэро- и наземных электроразведочных систем, используемых при поиске кимберлитов в республике Ангола // Геофизика. 2014. 4. С. 17–22.
39. Могилевский В.Е., Бровкин Г.И., Контарович О.Р., Достижения, особенности и проблемы аэрогравиметрии // Разведка и охрана недр, 2015. 12., С. 16–25.
40. Овренко Т.А., Волковицкий А.К., Павлов Б.В., Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю. Модели и структура бортовых измерений пространственных физических полей // Проблемы управления. 2015. №3. С. 59–68.
41. International geomagnetic reference field, доступно по адресу <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>.
42. Barnes, D., Factor, J.K., Holmes, S.A., Ingalls, S., Presicci, M.R., Beale, J., Fecher, T., Earth gravitational model 2020, *American Geophysical Union, Fall meeting 2015*, abstract id. G34A-03.
43. Парселл Э. Электричество и магнетизм: учебное руководство / пер. с англ. под ред. А. И. Шальникова и А. О. Вайсенберга. М.: Наука, 1983. 416 с.
44. Болотин Ю.В., Вязьмин В.С. Методы I_2 и минимаксного оценивания в задаче определения аномалии силы тяжести по данным аэрогравиметрии с использованием сферического вейвлет-разложения // Гироскопия и навигация, 2015. № 3(90). С. 82–94.
45. Karshakov, E., Iterated extended Kalman filter for airborne electromagnetic data inversion, *Exploration Geophysics*, 2020, vol. 51, no. 1, pp. 66–73.
46. Leliak, P. Identification and evaluation of magnetic-field sources of magnetic airborne detector equipped aircraft, *IRE Transactions on aerospace and navigational electronics*, 1961, vol. ANE-8, no. 3, pp. 95–105.
47. Павлов Б.В., Каршаков Е.В., Тхоренко М.Ю. Процедура калибровки навигационной системы с магнитоградиентометром // XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, СПб: изд-во ЦНИИ Электроприбор, 2017. С. 48–51.
48. Волковицкий А.К., Гольдин Д.А., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Принципы построения, структура и алгоритмы аэроразведочных комплексов. Часть 1. Состояние, проблемы и теоретические основы. М.: ИПУ РАН, 2013. 142 с.
49. Huang, Y., Wu, L., Li, D., Theoretical research on full attitude determination using geomagnetic gradient tensor, *Journal of navigation*, 2015, 68, pp. 951–961.
50. Getscher, T., Frontera, P., Magnetic gradient tensor framework for attitude-free position estimation, *International technical meeting of the institute of navigation*, 2019, pp. 495–507.
51. Affleck, C.A., Jircitano, A., Passive gravity gradiometer navigation system, *Proceedings of the IEEE Position location and navigation Symposium*, 1990, pp. 60–66.
52. Gleason, D.M. Passive airborne navigation and terrain avoidance using gravity gradiometry, *Journal of guidance, control and dynamics*, 1995, vol. 18, no. 6, pp. 1450–1458.
53. Xiong, L., Xiao, L.W., Dan, B.B., Ma, J., Full tensor gravity gradient aided navigation based on nearest matching neural network, *Cross strait quad-regional radio science and wireless technology conference*, IEEE, 2013, pp. 462–465.
54. Welker, T.C., Pachter, M., Huffman Jr., R.E., Gravity gradiometer integrated inertial navigation, *European control conference*, Switzerland, 2013, pp. 846–851.
55. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Распределение эффективного удельного сопротивления пород как навигационное поле для корреляционно-экстремальных систем // Известия ЮФУ. Технические науки, 2012. № 3. С. 113–119.
56. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Часть 2. Современные тенденции развития // Гироскопия и навигация. 2015. № 4 (91). С. 147–159.
57. Степанов О.А., Носов А.С., Торопов А.Б. О классификации алгоритмов решения задачи навигации по геофизическим полям // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. С. 326–336.

58. Степанов О.А., Носов А.С. Алгоритм коррекции навигационной системы по данным карты и измерителя, не требующий предварительного оценивания значений поля вдоль пройденной траектории // *Гироскопия и навигация*. 2020. Т. 28. № 2 (109). С. 70–90.
59. Тхоренко М.Ю., Павлов Б.В., Каршаков Е.В., Волковицкий А.К. Интеграция бесплатформенной инерциальной навигационной системы с современными измерителями параметров аномального магнитного поля Земли // XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, сборник материалов. СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 26–29.
60. Тхоренко М.Ю., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Методы обработки геофизических данных для обеспечения работы навигационной системы, корректируемой по градиенту магнитного поля Земли // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления, сборник материалов. СПб: ИПУ РАН, 2019. С. 3012–3018.
61. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Часть 1. Обзор алгоритмов // *Гироскопия и навигация*. 2015. №3(90). С. 102–125.
62. HeliFALCON airborne gravity gradiometer and magnetic stinger survey, Geophysical survey report, Sullivan North, Missouri, Project 14012 USGS, by CGG, May 30, 2014. 43 p.
63. Бобров Д.С. Исследование алгоритмов подготовки навигационных гравиметрических карт по цифровым картам рельефа // Труды IV Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами». Москва: ГосНИИАС, 2019. С. 206–207.
64. Ley-Cooper, A.Y., Brodie, R.C., Richardson, M., AusAEM: Australia's airborne electromagnetic continental-scale acquisition program, *Exploration geophysics*, 2020, vol. 51, no. 1, pp. 193–202.
65. Hoyer, A.-S., Jørgensen, F., Viezzoli, A., Menghini, A., Pedersen, S.A.S., Geological interpretation of structural geology and buried valleys at the foothills of the Rocky Mountains, British Columbia – Based on SkyTEM data, *AEM 2018 conference*, Denmark, 2018, pp. 1–4.
66. Reninger, P.-A., Martelet, G., Perrin, J., Dumont, M., Processing methodology for regional AEM surveys and local implications, *Exploration geophysics*, 2020, vol. 51, no. 1, pp. 143–154.
67. Мойланен Е.В., Гараков А.М., Каршаков Е.В. Аэрогеофизическая съемка Республики Руанды (26 000 км²) с помощью системы «Экватор» // Материалы 10-й международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем». 2017. Т. 2. С. 154–157.
68. Мельников П.В., Каршаков Е.В. Результаты опытных аэромагнитных работ по измерению горизонтальных градиентов магнитного поля с использованием самолета Ан-3 // Труды 14-й научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика». Алматы, 2018. С. 1–5.
69. Торге В. Гравиметрия. М.: Мир, 1999. 430 с.

Karshakov, E.V., Pavlov, B.V., Tkhorenko, M.Yu., and Papusha, I.A. (V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)
Promising Map-Aided Aircraft Navigation Systems, *Гироскопия и Навигация*, 2021, vol. 29, no. 1 (112), pp. 32–51.

Abstract. The paper analyses the development prospects for aircraft navigation systems using onboard geophysical field measurements. Prospective systems that are not widely applied yet are considered: magnetic gradiometers measuring the stationary magnetic field gradient, gravity gradiometers measuring the gravity field gradient, and electromagnetic systems measuring the alternating part of magnetic field. We discuss the main problems to be solved during airborne measurements of these parameters and give an overview of algorithms and hardware solutions. We analyse the results of onboard measurements and estimate the possible navigation accuracy.

Key words: magnetic field gradient, gravity field gradient, electromagnetic field, geophysical field navigation (map-aided navigation), 3D physical field.

Материал поступил 30.10.2020