

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hong-Chih Liu, Mandiam D. Srinath.* Partial Shape Classification Using Contour Matching in Distance Transformation. IEEE Trans on PAMI 1990. – Vol. 12. – № 11. – P. 1072-1079.
2. *Важинский В.Н., Иванова Е.Е., Тетерин В.В.* Структурный метод распознавания частично искаженных контурных изображений. Оптический Журнал. – 1996. – № 8. – С. 37-42.
3. *Borgefors G.* // Computer Vision Graphics and Image Processing. – 1984. – Vol. 34. – P. 334-371.

**Павлова Валерия Анатольевна**

"Научно-производственная корпорация "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова".

E-mail: leader@soi.ru, vapavlova-goi@mail.ru.

199034, г. Санкт-Петербург, Биржевая линия, 12.

Тел.: 88123317555; тел./факс: 88123285691.

**Крюков Сергей Николаевич**

**Каркаева Регина Камалутиновна**

**Созинова Мария Владимировна**

**Pavlova Valeriya Anatol'evna**

Research assistant of S.I. Vavilov State Optical Institute.

E-mail: leader@soi.ru, vapavlova-goi@mail.ru.

12, Birzhevaya linya, Saint Petersburg, 199034, Russia.

Phone: 88123317555; phone/fax: 88123285691.

**Krjukov Sergey Tikolaevich**

**Karkaeva Regina Kamalutinovna**

**Sozinova Maria Vladimirovna**

УДК 550.837.6

**Е.В. Каршаков, Б.В. Павлов**

**НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧИ ИЗМЕРЕНИЯ  
ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА БОРТУ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

*Доклад посвящен обзору навигационных задач, решаемых для обеспечения точности измерений магнитного, гравитационного, электромагнитного полей на борту летательного аппарата-носителя. В каждом из рассмотренных случаев определение навигационных параметров позволяет компенсировать паразитную составляющую измерений, связанную с движением носителя.*

*Навигация; аэромагнитометрия; аэрогравиметрия; аэроэлектроразведка.*

**E.V. Karshakov, B.V. Pavlov**

**NAVIGATIONAL SUPPORT OF THE AIRBORNE PHYSICAL FIELDS  
MEASUREMENTS**

*The report gives a review of navigation tasks which are solved to provide accurate measurements in airborne magnetics, gravimetry and electromagnetics. In each case navigation solution allows compensating of noise that appears during the aircraft motion.*

*Navigation; airborne magnetics; airborne gravimetry; airborne electromagnetics.*

**Введение.** Измерение физических полей лежит в основе многих геологоразведочных, инженерных, экологических задач. Кроме того, одна из актуальных проблем навигации летательных аппаратов – использование измерений физических полей, таких как гравитационное или магнитное, в качестве альтернативного или дополнительного источника навигационной информации [1]. Однако применение систем измерения физических полей на борту летательного аппарата сопряжено с серьезными трудностями. Сам факт движения летательного аппарата приводит к возникновению паразитного сигнала, который необходимо компенсировать тем или иным способом.

Так, при измерениях магнитного поля Земли, влияние намагничивания летательного аппарата в процессе эволюций относительно вектора магнитного поля Земли меняется и оказывает влияние на показания магнитометра на порядки большие, чем амплитуда магнитных аномалий, которые должны идентифицироваться [2]. В случае гравиметрии траекторные ускорения носителя на несколько порядков превышают амплитуды искомым аномалий поля силы тяжести [3]. В некоторых случаях при электромагнитном зондировании также требуется учет движения летательного аппарата, поскольку поле токов, индуцируемых в проводящих элементах носителя может быть сопоставимо с полем отклика, порожденного проводимостью пород [4]. В табл. 1 приведены характерные значения для измеряемых значений и для помех.

Все три указанных метода используют различные подходы при компенсации влияния движения носителя. Однако можно выделить, по крайней мере одно характерное для всех свойство. Решение задачи компенсации требует решения навигационной задачи в той или иной постановке. Для магнитометрии важно знание углов поворота летательного аппарата относительно вектора магнитного поля Земли. При электромагнитном зондировании требуется информация о взаимном расположении источника помех, которым в данном случае является самолет или вертолет, и датчика переменного магнитного поля. Для гравиметрии очевидна необходимость высокоточной информации об ускорениях и об углах ориентации гравиметра. В докладе рассматривается каждый из методов.

Таблица 1

**Характерные значения поля и помех, связанных с движением ЛА**

Метод	Величина поля	Величина помехи	Точность невозмущенных измерений
Магнитометрия	50 000 нТл	100 нТл	0,1-0,01 нТл
Электромагнитное зондирование	10 000 мкА/м	100 мкА/м	1 мкА/м при осреднении 1 с
Гравиметрия	1 000 Гал	100 Гал	0,0001 Гал при осреднении 60 с

**Аэромагнитометрия.** При проведении магнитных съемок с использованием подвижных носителей, в частности, самолета или вертолета, на датчик прибора действует не только магнитное поле Земли, но и поле самого носителя, что вызывает искажение (девиацию) результатов измерений. При изменении ориентации летательного аппарата меняется и величина девиации.

Задача компенсации в магнитометрии возникла несколько веков назад применительно к морскому магнитному компасу. В 1824 г. Пуассоном была предложена линейная модель намагничивания, которая описывает влияние постоянного

намагничивания, жестко связанного с корпусом подвижного объекта, и магнитомягких материалов, намагничение которых зависит от величины и направления магнитного поля Земли.

Использование авиации для магнитной съемки в середине прошлого века привело к тому, что появилась модификация Пуассоновской модели, а именно – модель Лелиака [5]. Оказалось, что при скоростях движения летательных аппаратов нельзя не учитывать поле вихревых токов, возникающих в фюзеляже согласно закону электромагнитной индукции Фарадея.

В нашей стране развитие методов компенсации связано с именами А.Э. Вацуро и В.С. Циреля, Рудгеофизика [6]. Большой вклад также внес коллектив разработчиков во главе с В.В. Аверкиевым и В.А. Могилевкиным [7].

Согласно модели Лелиака помеха, вызванная эволюциями летательного аппарата, параметризуется ограниченным набором постоянных величин, входящих в нее. Если эти параметры известны, а также известны направляющие косинусы вектора магнитного поля Земли в осях летательного аппарата, то помеха, приводящая к девиации магнитометра, может быть вычислена.

При определении направляющих косинусов используется векторный магнитометр. Для идентификации параметров помехи и последующего ее исключения из измерений выполняется калибровочный полет на такой высоте, на которой спектр магнитных помех, обусловленных эволюциями летательного аппарата, существенно разнесен со спектром аномалии магнитного поля Земли.

Традиционный подход предполагает идентификацию параметров намагничивания по высокочастотной компоненте поля, измеренной в зоне калибровки. Немаловажно, что при выполнении тангажных эволюций существенно меняется высота, так что нельзя уже пренебрегать влиянием вертикального градиента магнитного поля. Возможен также подход, основанный на построении стохастической модели магнитного поля Земли в зоне калибровки [8]. При таком подходе задача идентификации параметров помехи и модели поля сводится к стандартной линейной задаче оценивания, решаемой с использованием методов субоптимального калмановского сглаживания.

**Аэроэлектромагнитные системы.** Электромагнитный метод предполагает наличие источника переменного магнитного поля. Существуют модификации, где в качестве источника поля используются так называемые естественные поля. Но большинство электромагнитных систем использует контролируемый источник поля. Именно для таких систем задача компенсации помех, связанных с эволюциями носителя, представляет наибольший интерес.

Существует очень большая зависимость измеренного поля от положения приемника относительно передатчика и их обоих относительно Земли. Кроме того, в тех случаях, когда источник поля располагается вблизи фюзеляжа летательного аппарата, возникает задача компенсации поля токов, наведенных на борту носителя.

Одним из первых в нашей стране этой задачей занимался Б.С. Светов, идеолог аэрометода дипольного индуктивного профилирования [9]. В последние годы новая модификация этого метода, система ЕМ-4Н, стала самой широко используемой системой в нашей стране – сотни тысяч погонных километров в год. И это произошло в значительной степени благодаря новому методу компенсации [4]. В основе этого метода лежит идея возбуждения поля, представимого тремя диполями, вектора которых образуют базис. В этом случае поле наведенных в фюзеляже токов выражается через линейную комбинацию векторов поля каждого из диполей. Кроме того, измерения этих трех векторов позволяют определить взаимное

расположение передатчика и приемника с точностью порядка 10 см, углы ориентации с точностью 1 градус [10].

**Аэрогравиметрия.** Целью аэрогравиметрии является определение аномалии силы тяжести на траекториях полетов летательного аппарата-носителя. Полученные данные служат основой для построения карт гравитационных аномалий.

Наиболее распространенным способом аэрогравиметрии является измерение вертикальной компоненты поля. Для этого используются платформенные инерциально-гравиметрические комплексы с однокомпонентным вертикальным чувствительным элементом, ось чувствительности которого совпадает с приборной вертикалью. К таким системам относятся Гравитон-М (ГНПП Аэрогеофизика), МАГ-1 или ГТ-1А (Гравиметрические технологии) и Чекан АМ (ЦНИИ Электроприбор), AIRGrav (Sander Geophysics). Указанные фирмы-производители являются также и основными разработчиками алгоритмов компенсации. Стоит также отметить работы коллектива лаборатории управления и навигации МГУ под руководством Н.А. Парусникова, которые можно считать теоретической основой алгоритмов обработки данных гравиметрии [3,11]. Согласно этой теории, при обработке данных аэрогравиметрических измерений можно выделить следующие основные этапы:

- 1) дифференциальное фазовое решение задачи спутниковой навигации;
- 2) определение угловых ошибок горизонтирования платформы и вычисление переносных сил инерции (поправки Этвеша);
- 3) определение аномалии силы тяжести на траектории полета и построение карт аномального гравитационного поля.

Аномалия силы тяжести в математической постановке есть результат решения основного гравиметрического уравнения, под которым понимается уравнение движения материальной точки  $M$  единичной массы, соответствующей чувствительной массе гравиметра, в поле силы тяжести Земли под воздействием внешней силы, доступной измерению в проекции на вертикальную ось. Под вертикалью понимается нормаль к поверхности модельного эллипсоида, например, WGS-84. В этом уравнении слева стоит вторая производная по времени от высоты точки  $M$  над эллипсоидом, а справа вертикальная составляющая удельной силы, действующей на точку  $M$ , инерциальные составляющие, которые вместе носят название поправки Этвеша, нормальная составляющая удельной силы тяжести, определяемая, например, из формулы Гельмерта, и, наконец, аномалия силы тяжести, подлежащая определению. Решить основное гравиметрическое уравнение – значит выразить из него величину вертикальной составляющей удельной силы. При этом вертикальное ускорение и поправку Этвеша можно рассматривать как помеху, обусловленную движением летательного аппарата-носителя.

Первый этап определения аномалии гравитационного поля требует дифференциального фазового решения задачи спутниковой навигации с использованием одной или нескольких базовых станций. Важной особенностью применяемых алгоритмов является получение скоростной информации с использованием приращений фазы, в которой надежнее отслеживаются целочисленные неопределенности. В результате, с учетом смещения антенны спутниковой навигационной системы, определяются параметры движения материальной точки  $M$  в проекции на вертикальную ось.

На втором этапе определяются компоненты скорости, необходимые для введения поправки Этвеша и ошибки горизонтирования платформы. Для этой цели производится тесное комплексирование инерциальной и спутниковой навигационных систем. Задача комплексирования ставится как задача коррекции инерциальной навигации при помощи первичных измерений спутниковой навигационной

системы в дифференциальном режиме и решается методами субоптимального калмановского сглаживания.

Таким образом, выполнение первых двух этапов обработки гравиметрических данных решает задачу компенсации помех, вызванных эволюциями летательного аппарата.

На третьем этапе осуществляется решение основного гравиметрического уравнения методами нестационарной адаптивной калмановской фильтрации и сглаживания, после чего производится построение карт аномалий гравитационного поля в свободном воздухе (редукция Фая).

**Заключение.** Был предложен комплексный подход к задачам повышения точности измерения физических полей на борту летательного аппарата. Для решения основной проблемы – влияния динамики летательного аппарата – используется решение навигационной задачи в той или иной постановке. Наибольшего результата удалось добиться для электромагнитных систем: полученная точность навигационного решения не уступает точности дифференциального режима спутниковой навигационной системы, а качество измеряемых данных улучшилось, по крайней мере, на порядок. На данном этапе развитие методов измерения физических полей постепенно приводит к использованию градиентометров. Это позволит решить ряд проблем, связанных, например, с вариациями глобального поля, повысит детальность получаемых материалов. Это потребует нового подхода к навигационному обеспечению таких систем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пешехонов В.Г.* Навигационные системы // Вестник Российской академии наук. – 1997. – № 1 (67). – С. 43-48.
2. *Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Харичкин М.В.* Система аэромагнитной съемки аномалий магнитного поля // Датчики и системы. – 2007. – № 8. – С. 17-21.
3. *Болотин Ю.В., Голован А.А., Кручинин П.А., Парусников Н.А., Тихомиров В.В., Трубников С.А.* Задача авиационной гравиметрии. Некоторые результаты испытаний. // Вестник Московского университета. Сер. 1. Математика. Механика. – 1999. – № 2. – С. 36-41.
4. *Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Попович В.В.* Низкочастотная индуктивная аэроразведочная система ЕМ-4Н. // Материалы XXXV сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». – Ухта, 2008. – С. 51-54.
5. *Leliak P.* Identification and Evaluation of Magnetic-Field Sources of Magnetic Airborne Detector Equipped Aircraft // IRE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics. – 1961. – P. 95-105.
6. *Вацуро А.Э., Цирель В.С.* Измерения и компенсация магнитных помех самолета Ан-2 (принципы и методы) // Геофизическая аппаратура. – 1979. – Вып.69. – С. 95-112.
7. *Могилевкин В.А., Аверкиев В.В., Герловин М.С., Кандзюба С.Л., Осмоловский В.Н.* Компенсация магнитных помех авиационных носителей // Разведка и охрана недр. – 2001. – № 9. – С. 52-58.
8. *Каршаков Е.В., Харичкин М.В.* Стохастическая задача оценивания при компенсации девиации аэромагнитометра // Автоматика и телемеханика. – 2008. – 7. – С. 68-77.
9. *Светов Б.С., Еришов Е.М.* О влиянии корпуса самолета на поле установленной на нем генераторной петли // Труды ЦНИГРИ. – 1970. – Вып. 89.
10. *Павлов Б.В., Волковицкий А.К., Каршаков Е.В.* Низкочастотная электромагнитная система относительной навигации и ориентации // Труды 16-й Международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб., 2009. – С. 236-243.
11. *Болотин Ю.В., Голован А.А., Парусников Н.А.* Уравнения аэрогравиметрии. Алгоритмы и результаты испытаний. – М.: Изд-во механико-математического факультета МГУ. – 2002. – 120 с.

**Каршаков Евгений Владимирович**

Институт проблем управления (ИПУ РАН).

E-mail: karshak@mail.ru.

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65.

Тел.: 84953347168.

**Павлов Борис Викторович**

E-mail: pavlov@ipu.ru.

Тел.: 84953349351.

**Karshakov Evgeny Vladimirovich**

Institute of Control Sciences (ICS RAS).

E-mail: karshak@mail.ru.

65, Profsoyuznaya street, 117997, Moscow, Russia.

Phone: 84953347168.

**Pavlov Boris Viktorovich**

E-mail: pavlov@ipu.ru.

Phone: 84953349351.

УДК 550.837.6

**А.К. Волковицкий****ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И НАВИГАЦИИ**

*Доклад посвящен задачам измерения физических полей и их навигационным приложениям. В докладе представлены результаты, достигнутые при разработке систем измерения физических полей. Дается обзор возможных приложений в задачах навигации и управления движением. Также приведены примеры обработки измерений геофизических систем.*

*Навигация; магнитометрия; магнито-градиентометрия; электромагнитные системы.*

**A.K. Volkovitskiy****PHYSICAL FIELDS MEASUREMENTS IN MOTION CONTROL  
AND NAVIGATION TASKS**

*The report is dedicated to the physical fields measurements and their applications in navigation tasks. The results achieved during physical fields measurement systems development are presented. A review of possible navigation and motion control applications is given. Examples of geophysical systems data processing are also provided.*

*Navigation; magnetometry; magnetic gradientometry; electromagnetics.*

**Введение.** Решение задач навигации и управления движением традиционно связаны с измерением параметров физических полей. Направление силы тяжести служит основой работы инерциальных систем, отклонение магнитной стрелки компаса использовалось для целей навигации с древнейших времен.

Многие разработчики стараются использовать данные гравитационных и магнитных измерений для повышения точности длительной автономной навигации. В частности, известны работы по использованию гравитационных данных в качестве априорной информации для корреляционно-экстремальных систем позиционной и ориентационной коррекции [1].

Измерение параметров физических полей играют важнейшую роль при решении задач пеленгации и наведения. Магнитная пеленгация и наведение – важ-