

И. А. АКИМОВ, Е. С. БОБКОВА, В. С. ВЯЗЬМИН
(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва)

ОЦЕНИВАНИЕ УКЛОНЕНИЙ ОТВЕСНОЙ ЛИНИИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ БЕСКАРДАННОГО АЭРОГРАВИМЕТРА НА ПОВТОРНЫХ ГАЛСАХ

Предложен алгоритм векторной аэрогравиметрии при измерениях на повторных галсах, основу которого составляют уравнения ошибок БИНС и корректирующих измерений (СНС). Априорная модель горизонтальных компонент вектора силы тяжести вводится при помощи базисных сплайнов, параметризованных координатой вдоль галса. Коэффициенты при сплайнах неизвестны, входят в фазовый вектор уравнений ошибок и оцениваются при помощи фильтра Калмана. Для уточнения оценок инструментальных погрешностей БИНС предложен алгоритм докалибровки по повторным галсам. Представлены результаты обработки модельных данных.

Введение. Работа посвящена аэрогравиметрическим съемкам с бескарданным аэрогравиметром, в состав которых входит бескарданная инерциальная навигационная система (БИНС) навигационного класса и приемники спутниковой навигационной системы (СНС) [1-2]. Традиционно в аэрогравиметрии определяется вертикальная компонента вектора силы тяжести (аномалия). Определение горизонтальных компонент затруднено, так как они наблюдаются в комбинации с инструментальными погрешностями инерциальных датчиков БИНС аэрогравиметра [3]. Для их разделения требуется дополнительная информация (модель) о векторе силы тяжести [4-5]. Другие возможные пути решения задачи основаны на привлечении дополнительных измерений и здесь не рассматриваются [1, 6].

В работе представлен подход к решению задачи в предположении, что траектория полета включает повторные галсы. Априорная модель горизонтальных компонент вектора силы тяжести вводится с учетом зависимости от координат на галсе (при помощи локальных кубических B -сплайнов), а задача векторной аэрогравиметрии сводится к интеграции БИНС-СНС и фильтру Калмана [7]. На модельных данных показано, что новый подход позволяет существенно повысить точность векторной аэрогравиметрии.

Также в работе предложен метод докалибровки БИНС на повторных галсах, сводящийся к формированию разности измерений на паре галсов и методу наименьших квадратов. Представлены результаты обработки реальной съемки с облетом рельефа.

Постановка задачи и алгоритм решения.

Введем географическую систему координат с центром в точке M , положении чувствительной массы акселерометров БИНС аэрогравиметра, и вектор возмущения силы тяжести $\Delta \mathbf{g} = \mathbf{g} - \mathbf{g}_0$, составленный из проекций на восток, север и вверх по нормали к эллипсоиду. В упомянутой формуле \mathbf{g} и \mathbf{g}_0 – векторы реальной и нормальной силы тяжести в точке M . Разделим задачу векторной аэрогравиметрии, представляющую собой определение $\Delta \mathbf{g}$, на две: определение горизонтальных компонент, пропорциональных отклонениям отвесной линии (для краткости будем их называть «УОЛ»), и определение вертикальной компоненты (аномалии). Решение второй задачи рассмотрено, например, в [4]. Целью данной работы является решение первой задачи. Будем предполагать, что траектория полета включает повторные галсы.

Оценивание отклонений отвесной линии на повторных галсах. В основу решения задачи определения УОЛ положены известные уравнения ошибок БИНС для горизонтальных каналов и уравнения корректирующих измерений, формируемых по данным СНС [7]. В состав вектора ошибок включены следующие переменные, где индекс « z » означает проекцию на оси приборного трехгранника, связанного с БИНС аэрогравиметра:

- $\Delta g_E, \Delta g_N$ – восточная и северная компоненты УОЛ;
- $\Delta f_{z1}, \Delta f_{z2}$ – постоянные во времени смещения нулей «горизонтальных» акселерометров БИНС;
- v_{z1}, v_{z2}, v_{z3} – постоянные во времени дрейфы гироскопов БИНС;
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – компоненты вектора малого поворота, характеризующего ошибку определения ориентации приборного трехгранника по измерениям гироскопов;

- $\delta V_E, \delta V_N$ – динамические ошибки скорости;
- $\Delta l_{z1}, \Delta l_{z2}, \Delta l_{z3}$ – постоянные во времени смещения антенны СНС относительно БИНС.

Заметим, что в составе переменных отсутствуют ошибки координат, поскольку координаты точки M в работе предполагаются известными точно (из СНС) и, следовательно, уравнения ошибок БИНС могут быть записаны в редуцированной форме [1, 7].

Априорную модель компонент УОЛ введем при помощи кубических B -сплайнов в виде [8]

$$\Delta g(s(t)) = \sum c_i B_i(s(t)), \quad (1)$$

где $s=s(t)$ – расстояние вдоль галса, $B_i(s)$ – кубический B -сплайн, c_i – коэффициенты модели (неизвестные константы), $i=1, \dots, N$, i – номер узла разбиения вдоль галса (шаг разбиения Δs постоянный), N – число узлов в разбиении. Модель (1) является C^2 -гладкой функцией на отрезке [8]. Другое важное свойство модели – компактность носителя B -сплайна, что позволяет уменьшить зависимость коэффициентов модели (1) от измерений на разворотах между галсами.

Включим коэффициенты c_i в состав фазового вектора уравнений ошибок и сформулируем задачу векторной аэрогравиметрии как задачу оптимального стохастического оценивания. Оценка фазового вектора (с числом неизвестных $2N+13$) определяется фильтром Калмана. Оценки УОЛ определяются по c_i , оцененным на последнем шаге рекурсии фильтра, по (1).

Докалибровка БИНС на повторных галсах. Ниже предлагается метод, позволяющий повысить точность оценок систематических составляющих инструментальных погрешностей БИНС по измерениям на повторных галсах. Предполагается, что систематические составляющие (смещения нулей акселерометров, угловые ошибки вертикали, неточности определения смещения антенны) постоянны в течение полета, а аномалия на повторных галсах одинакова. Тогда, формируя разность измерений аэрогравиметра на двух галсах, можно свести задачу калибровки к задаче метода наименьших квадратов.

Результаты докалибровки БИНС могут быть использованы перед решением задачи оценивания УОЛ (введением поправок к смещениям антенны, списанием оценок смещений нулей). Эти результаты могут быть также использованы для повышения точности скалярной аэрогравиметрии, однако рассмотрение этих приложений выходит за рамки работы.

Результаты оценивания УОЛ. Для проверки нового алгоритма оценивания УОЛ были симулированы измерения бескарданного аэрогравиметра на траектории, включавшей два повторных галса на постоянной высоте. Случайные погрешности измерений инерциальных датчиков БИНС имитировались с характеристиками близкими к реальным (аэрогравиметр *iCORUS*). Симулированные систематические инструментальные погрешности включали смещения нулей акселерометров ($\Delta f_{z1} = 30, \Delta f_{z2} = -40$ мГал) и постоянные дрейфы гироскопов (~ 0.003 град./час). Компоненты вектора силы тяжести симулированы по данным *EGM2008*.

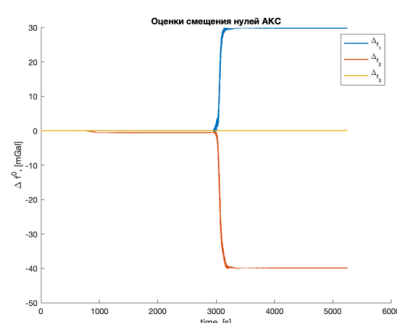


Рис. 1. Оценки смещений нулей акселерометров, мГал.

Основные результаты работы алгоритма (фильтр Калмана) включают оценки смещений нулей первого и второго акселерометров $\Delta f_{z1}, \Delta f_{z2}$ (рис. 1), оценки угловых ошибок ориентации $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ (рис. 2), оценки восточной и северной компонент УОЛ $\Delta g_E, \Delta g_N$ (рис. 3). Отметим высокую точность оценивания смещений нулей $\Delta f_{z1}, \Delta f_{z2}$ (разность с эталоном – 1 мГал). Точность оценивания УОЛ составила 3 мГал (СКО) и 1-4 мГал (среднее) при сопоставлении с эталоном. Данный результат можно считать обнадеживающим, учитывая величину оценок угловых ошибок (рис. 2), достигающую 6-8 угл. сек. (то есть погрешность определения УОЛ при их «прямом» измерении составила бы 30-40 мГал).

На рис. 3 представлены также результаты оценивания УОЛ при помощи «стандартного» подхода, отличающегося от нового лишь моделью УОЛ (используется традиционная в скалярной аэрогравиметрии модель во времени). Алгоритм оценивания – фильтр Калмана. Оценка УОЛ в «стандартном» подходе определяется на всей траектории полета, затем из нее выделяются оценки на повторных галсах, после чего строится результирующая оценка УОЛ как среднее арифметическое оценок на повторных галсах.

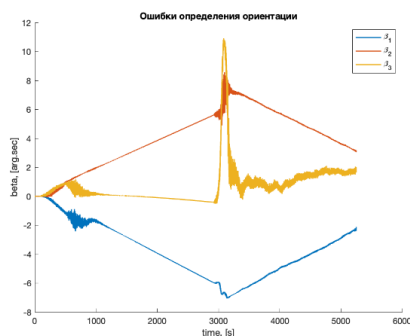


Рис. 2. Оценки угловых ошибок определения вертикали (синий и красн. цв.) и азимутальной ошибки (желт. цв.), угл. сек.

тангажа (облет рельефа). Полет включал четырех повторных галса, аэрогравиметр – *iCORUS*. Посчитанные оценки калибровочных параметров и числа обусловленности матриц позволили выявить низкую численную обусловленность задачи, в связи с чем была проведена ее регуляризация (по Тихонову). Результаты даны в табл. 1.

Закключение. Предложен новый алгоритм оценивания УОЛ, учитывающий повторяемость УОЛ на повторных галсах (при помощи модели на основе локальных *B*-сплайнов). Эффективность алгоритма (разделение оценок УОЛ и инструментальных погрешностей БИНС) подтверждена обработкой симитированных данных. При сравнении с алгоритмом оценивания УОЛ на основе традиционной модели во времени новый алгоритм показал значительно более точные результаты – 3 мГал против 4-6 мГал (СКО), 1-4 мГал против 8-12 мГал (среднее значение ошибки оценки УОЛ).

Также в работе предложен и опробован на реальных данных метод докалибровки БИНС на повторных галсах. Выявлена низкая численная обусловленность задачи, требующая регуляризацию. Рметод регуляризации по Тихонову, показавший обнадеживающие результаты. Требуется проверка метода на более динамичных полетах.

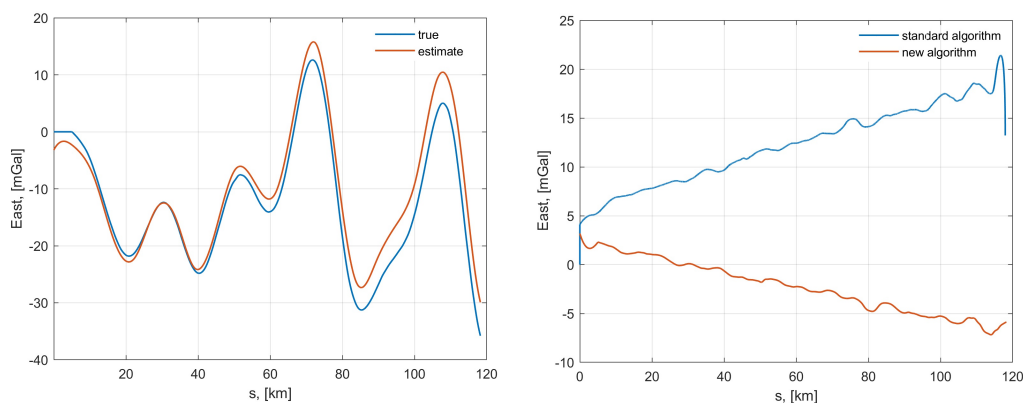


Рис. 3. Оценка восточной компоненты УОЛ новым алгоритмом и эталон (слева). Ошибки оценок восточной компоненты УОЛ новым и «стандартным» алгоритмами (справа), мГал.

Т а б л и ц а 1

Оценки калибровочных параметров БИНС *iCORUS*

Параметры	Галсы 1, 3	Галсы 2, 4
Δl_{z1} , м	0.11	0.13
Δl_{z2} , м	-0.57	-0.56
Δl_{z3} , м	0.07	-0.53
$\Delta \beta_1$, угл. мин.	-0.7	2.0
$\Delta \beta_2$, угл. мин.	-0.9	1.0
Δf_{z1} , мГал	-22	44
Δf_{z2} , мГал	1	-79

ЛИТЕРАТУРА

1. **Современные методы и средства** измерения параметров гравитационного поля Земли. Под общ. ред. Пешехонова В.Г., науч. ред. Степанова О.А. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2017. 390 с.
2. **Вязьмин В.С., Голован А.А., Бровкин Г.И.** Особенности обработки измерений бескарданного аэрогравиметра для геофизических приложений. Геофиз. иссл., 2024. Т. 25. С. 40–56.
3. **Kwon J.H., Jekeli C.** The effect of stochastic gravity models in airborne vector gravimetry. J. Geoph., 2002. P. 770–776.
4. **Вязьмин В.С., Голован А.А.** Скалярная и векторная бескарданная аэрогравиметрия на самолетах и БПЛА: методика проведения съемок и обработки данных. Сб. трудов XXX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2023. С. 10–15.
5. **Степанов О.А., Кошаев Д.А., Моторин А.В.** Идентификация параметров модели аномалии в задаче авиационной гравиметрии методами нелинейной фильтрации. Гироск. навиг. 2015. Т. 90. С. 95–101.
6. **Mangold U.** Theory and performance prediction for continuous vector gravimetry based on a DGPS augmented rate bias inertial navigation system and a star tracker. J. Instit. Navig. Vol. 44, 1997. P. 329–346.
7. **Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А.** Математические основы инерциальных навигационных систем. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2020. 164 с.
8. **Cheney E.W., Kincaid D.R.** Numerical Mathematics and Computing. Brooks/Cole Publishing Co., 2007. 784 pp.

I. A. Akimov, E. S. Bobkova, V. S. Vyazmin (Lomonosov Moscow State University, Moscow)

Estimating deflections of the vertical from strapdown airborne gravimeter measurements at repeated lines

An algorithm for solving the airborne vector gravimetry problem using measurements of a strapdown airborne gravimeter at repeated lines is presented. The basic equations are the error equations of gravimeter's inertial measurement unit (IMU) and the observation equations (satellite system's receiver data). An a priori model of the gravity vector horizontal components is introduced using basis splines parameterized by the coordinate along a repeated line. The coefficients at the splines are unknown constants and included in the error equations' phase vector, which is estimated by the Kalman filter. In order to refine the estimates of the IMU instrumental errors, a calibration algorithm based on two repeated lines is proposed. The results of simulated data processing are presented.