

А. А. ГОЛОВАН, В. С. ВЯЗЬМИН

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ АЭРОГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ СЪЕМОК И ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ БЕСКАРДАННОГО АЭРОГРАВИМЕТРА

Статья посвящена методическим аспектам подготовки и проведения аэрогравиметрических съемок, вопросам разработки и применения соответствующего программно-математического обеспечения, когда в качестве аэрогравиметров используется инерциально-измерительный блок (ИИБ) или инерциальная навигационная система, построенная на бескарданной технологии. В рассматриваемой задаче инерциальной аэрогравиметрии в качестве основного источника первичной информации служат показания датчиков ИИБ – акселерометров и датчиков угловой скорости. Вторым, не менее важным источником информации служат первичные измерения – кодовые, доплеровские, фазовые – приемников сигналов глобальных спутниковых навигационных систем, установленных на борту летательного аппарата и наземных базовых станциях. Представленный в статье материал базируется на практическом опыте многолетней работы авторов в области аэрогравиметрии.

Ключевые слова: аэрогравиметрия, бескарданный гравиметр, вектор силы тяжести, БИНС, ГНСС, постобработка, оценивание, фильтр Калмана.

Введение

Аэрогравиметрия является разделом гравиметрии, который занимается разработкой методов и средств измерения силы тяжести Земли с борта летательного аппарата (ЛА) (самолета, вертолета), востребованных в геофизике, геодезии и навигации и хорошо зарекомендовавших себя на практике.

В последние годы в аэрогравиметрии все более актуальным становится применение бескарданной технологии, когда в качестве аэрогравиметров используется инерциально-измерительный блок (ИИБ) или бескарданная инерциальная навигационная система [1–3]. Основным источником первичной информации в задаче бескарданной инерциальной аэрогравиметрии служат показания датчиков ИИБ – акселерометров и датчиков угловой скорости (ДУС). Вторым, не менее важным источником информации являются первичные измерения – кодовые, доплеровские, фазовые – приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), устанавливаемых на борту ЛА и на наземных базовых станциях.

Голован Андрей Андреевич. Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией управления и навигации, механико-математический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0001-5628-248X.

Вязьмин Вадим Сергеевич. Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория управления и навигации, механико-математический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова. ORCID 0000-0003-3848-6045.

Подробный обзор современного состояния разрабатываемых в мире бескарданных инерциальных аэрогравиметров представлен в недавней работе [2].

Настоящая статья посвящена методическим аспектам подготовки и проведения аэрогравиметрических съемок с бескарданными аэрогравиметрами, вопросам разработки и применения соответствующего программно-математического обеспечения. Представляемый материал основан на практическом опыте работы авторов в области как бескарданной, так и платформенной аэрогравиметрии [1, 4–7]. В рамках последней в 2000-х гг. было разработано, внедрено и сопровождается по настоящее время программно-математическое обеспечение [8–10] постобработки первичных данных аэрогравиметра GT-2А [11–12] (ООО НТП «Гравтехнология», Москва), в котором используется карданов подвес гравиметрического чувствительного элемента.

С 2020 г. в лаборатории управления и навигации МГУ имени М.В. Ломоносова [13] ведутся научно-исследовательские работы в области бескарданной аэрогравиметрии с аэрогравиметрами различных серий фирмы iMAR (ФРГ) [14] и прототипом бескарданного аэрогравиметра отечественного производителя. Исследования осуществляются в тесном сотрудничестве с компанией АО «ГНПП «Аэрогеофизика» (Москва) [15], которая в период с 2020-го по 2022 г. выполнила ряд аэрогравиметрических съемок на разных носителях – самолетах различных серий (Ан-30, Ан-3Т, Cessna 208В) и беспилотных летательных аппаратах вертолетного типа – при использовании указанных аэрогравиметров. Обработкой первичной информации аэрогравиметров занимались специалисты лаборатории управления и навигации МГУ [3, 16–17]. Им были также доступны данные одной из съемок с аэрогравиметром iMAR [5], любезно предоставленные профессором Датского технического университета Р. Форсбергом.

Ниже излагаются результаты и выводы, полученные авторами при разработке и внедрении методики проведения аэрогравиметрических съемок с бескарданными аэрогравиметрами, создании и применении программно-математического обеспечения постобработки их первичных данных.

Статья имеет следующую структуру. Сначала кратко описывается задача бескарданной аэрогравиметрии и ее опорных математических моделей. Далее рассматриваются задачи, связанные с инерциальными информационными технологиями: калибровка ИИБ аэрогравиметра (стендовая, предполетная и послеполетная), начальная и конечная выставки ИИБ, экспресс-диагностика первичных данных ИИБ и ГНСС, построение решений ГНСС в стандартном и дифференциальном режимах, интеграция ИИБ и ГНСС. Наконец, приводится описание составных моделей и подходов к решению гравиметрической задачи – оценивания аномалии (либо вектора возмущения) силы тяжести на траектории носителя аэрогравиметрического комплекса.

В отношении аэрогравиметра авторы используют термин «инерциально-измерительный блок», поскольку бескарданный аэрогравиметр здесь рассматривается прежде всего как регистратор первичных измерений инерциальных датчиков, и требования к его функционированию в режиме полноценной инерциальной навигационной системы в аэрогравиметрии не предъявляются.

Задача бескарданной инерциальной аэрогравиметрии

Под инерциальной аэрогравиметрией понимают [2] раздел гравиметрии, занимающийся разработкой методов и средств измерения параметров гравитационного поля Земли с борта летательного аппарата с использованием инерциальных технологий.

Ранее в аэрогравиметрии получили распространение платформенные аэрогравиметры, в состав которых входит горизонтируемая гиropлатформа [1, 11, 18–19]. Измеряемой величиной в таких приборах является прежде всего вертикальная компонента вектора силы тяжести. Развитие бескарданных инерциальных технологий предопределило переход к высокоточным бескарданным (бесплатформенным) инерциальным навигационным системам и/или бескарданным ИИБ. Далее такие аппаратные комплексы будем называть бескарданными аэрогравиметрами. В их состав входят также прецизионная система термостабилизации и приемники ГНСС (бортовой и наземные базовые станции). Бескарданные аэрогравиметры имеют ряд очевидных преимуществ перед платформенными аналогами [16, 20]: меньшие массогабаритные характеристики, энергопотребление и цена, возможность установки на беспилотную технику. Кроме того, они потенциально могут применяться для векторных измерений и в съемках в сложных динамических условиях (как с генеральным, так и с полным огибанием рельефа) [3]. Стоит отметить, что бескарданные (как и платформенные) комплексы могут устанавливаться и на морские объекты и использоваться для проведения морских гравиметрических измерений [2].

Постобработке первичных измерений бескарданных аэрогравиметров свойственны некоторые особенности, отличающие ее от постобработки измерений платформенных комплексов. К ним относится, во-первых, необходимость решения задач начальной и конечной выставки ИИБ аэрогравиметра, целью которых является определение смещения нулевого сигнала «вертикального» акселерометра ИИБ и линейной составляющей его дрейфа за время полета. Во-вторых, требуется расчет результатов инерциального счисления ИИБ (в автономном режиме). Кроме этого, чтобы выполнять измерения в сложных динамических условиях, повышенные требования предъявляются к калибровке ИИБ (как к составу калибровочной модели погрешностей инерциальных датчиков, так и к точности оценивания ее параметров).

На разработку и совершенствование алгоритмов бескарданной (и скалярной, и векторной) аэрогравиметрии направлены в настоящее время усилия нескольких научных групп в мире, в числе которых – научные коллективы Датского технического университета, Технического университета Дармштадта, компаний iMAR, Sander Geophysics Ltd. (Канада), Главного управления картографии Турции, Национального университета оборонных технологий (Китай) и др., а также российские научные коллективы АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон» и лаборатории управления и навигации МГУ имени М.В. Ломоносова [2, 5, 19–24].

Опорные уравнения бескарданной векторной аэрогравиметрии

Приведем опорную математическую модель задачи бескарданной аэрогравиметрии, которая может быть описана системой дифференциальных уравнений движения точки M – приведенной чувствительной массы блока акселерометров ИИБ аэрогравиметра – в осях опорной системы координат [1, 25]. В качестве последней для

определенности будем использовать сопровождающий географический трехгранник $Mx_E x_N x_{Up}$ (для краткости – Mx), ориентированный по сторонам света (E – восток, N – север, Up – вверх по направлению нормали к референц-эллипсоиду):

$$\dot{\lambda} = \frac{V_E}{(R_E + h) \cos \varphi}, \quad \dot{\varphi} = \frac{V_N}{R_N + h}, \quad \dot{h} = V_{Up}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_E &= (\Omega_{Up} + 2u_{Up})V_N - (\Omega_N + 2u_N)V_{Up} + f_E + \delta g_E, \\ \dot{V}_N &= -(\Omega_{Up} + 2u_{Up})V_E + (\Omega_E + 2u_E)V_{Up} + f_N + g_N^0 + \delta g_N, \\ \dot{V}_{Up} &= (\Omega_N + 2u_N)V_E - (\Omega_E + 2u_E)V_N + f_{Up} - g_0 - \delta g, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} f_E \\ f_N \\ f_{Up} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \gamma + \sin \psi \sin \theta \sin \gamma & \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \gamma - \sin \psi \sin \theta \cos \gamma \\ -\sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \theta \sin \gamma & \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin \theta \sin \gamma \\ -\cos \theta \sin \gamma & \sin \theta & \cos \theta \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{z_1} \\ f_{z_2} \\ f_{z_3} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Здесь λ, φ, h – географические координаты точки M (долгота, широта, высота над референц-эллипсоидом); V_E, V_N, V_{Up} – компоненты (восточная, северная, вертикальная) вектора линейной скорости движения точки M относительно Земли; $\Omega_E, \Omega_N, \Omega_{Up}$ – компоненты вектора угловой скорости вращения трехгранника Mx относительно Земли; u_E, u_N, u_{Up} – компоненты вектора угловой скорости вращения Земли ($u_E = 0, u_N = u \cos \varphi, u_{Up} = u \sin \varphi, u$ – модуль вектора угловой скорости вращения Земли); R_E, R_N – долготный и широтный радиусы кривизны Земли; $f_{z_1}, f_{z_2}, f_{z_3}$ – компоненты вектора удельной силы (кажущегося ускорения) реакции, действующей на точку M со стороны корпуса аэрогравиметра, в осях приборной системы координат (обозначаемой Mz) ИИБ. Полагаем, что после установки ИИБ на ЛА ось z_1 направлена в сторону правого крыла ЛА, ось z_2 – в сторону носа ЛА, ось z_3 перпендикулярна полу ЛА и направлена вверх. Далее, f_E, f_N, f_{Up} – результаты перепроецирования вектора удельной силы реакции с осей Mz на оси Mx , при этом используется матрица перехода, вид которой приведен в (3); ψ, ϑ, γ – углы истинного курса, тангажа, крена соответственно.

Наконец, δg – аномалия силы тяжести, $\delta g_E, \delta g_N$ – горизонтальные компоненты вектора возмущения силы тяжести, g_N^0 – северная проекция вектора нормальной силы тяжести (см. [26]), g_0 – абсолютное значение вектора нормальной силы тяжести, вычисляемое на основе расчетной формулы для нормальной силы тяжести на поверхности эллипсоида с поправкой за высоту в свободном воздухе [26], записываемой, например, для референц-эллипсоида ПЗ-90 в виде (единицы измерения – мГал)

$$g_0 = 978032,84 \cdot (1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000058 \sin^2 2\varphi) - 0,3086h. \quad (4)$$

Задача бескарданной аэрогравиметрии в широком смысле заключается в аппаратном, информационном моделировании (1)–(3) при помощи измерений инерциальных датчиков (акселерометров, ДУС) и первичных спутниковых измерений (кодовых псевдодальностей, доплеровских псевдоскоростей, фазовых измерений приемников ГНСС) с целью определения (оценивания) величин $\delta g_E, \delta g_N, \delta g$ на траектории полета

ЛА. В скалярной аэрогравиметрии необходимо по первичным измерениям оценить только вертикальную компоненту вектора возмущения силы тяжести – величину δg . В векторной аэрогравиметрии искомыми являются все три компоненты [27].

При решении задачи бескарданной аэрогравиметрии, сформулированной выше в достаточно общем виде, требуется:

- разработать методику подготовки и проведения аэрогравиметрической съемки как для всей площади планируемых работ, так и для отдельного вылета ЛА;
- последовательно решить ряд задач обработки первичных данных бескарданного аэрогравиметра с целью оценивания компонент вектора возмущения силы тяжести.

В табл. 1 приведена разработанная циклограмма подготовки и проведения аэрогравиметрической съемки с бескарданным аэрогравиметром, в табл. 2 – решаемые в постобработке задачи. Детальное математическое описание каждой из задач обработки составляет предмет отдельной публикации (и даже диссертации). Решение перечисленных задач поясняется в статье лишь в общих чертах.

Т а б л и ц а 1

Этапы подготовки и проведения аэрогравиметрической съемки с бескарданным аэрогравиметром

№	Задачи подготовки и проведения съемки	Назначение, решаемые подзадачи
1	Стендовая температурная калибровка	Поддержание требуемых точностных характеристик ИИБ аэрогравиметра. Рекомендуется проводить перед началом каждого нового съемочного сезона
2	Подготовка аэрогравиметра к первому вылету	Измерение параметров смещений антенны бортового ГНСС-приемника от центра ИИБ аэрогравиметра
		Определение координат опорной точки на аэродроме и опорного значения силы тяжести
		Определение координат базовых станций ГНСС
		Прогрев аэрогравиметра для выхода на рабочий температурный режим
3	Обеспечение оператором измерений по определенной методике в каждом вылете съемки	Статические измерения ИИБ на разных гранях корпуса на стоянке ЛА перед вылетом (для начальной выставки ИИБ и предполетной калибровки блока акселерометров)
		Наблюдение за функционированием ИИБ и ГНСС в полете (непрерывность записи, стабильность электропитания и т.п.). Если съемка выполняется на беспилотном ЛА, данный этап не проводится
		Статические измерения ИИБ на разных гранях корпуса на стоянке ЛА после приземления (для конечной выставки ИИБ и послеполетной калибровки блока акселерометров)
		Экспресс-диагностика первичных измерений ИИБ и бортового ГНСС-приемника. Решение о продолжении или приостановке вылетов при обнаружении проблем в данных

Задачи постобработки первичных измерений бескарданного аэрогравиметра

№	Задачи постобработки	Назначение
1	Задачи спутниковой навигации	Определение координат и относительных скоростей бортового приемника ГНСС в стандартном и дифференциальном режимах
2	Задачи начальной и конечной выставок ИИБ аэрогравиметра	Определение ориентации корпуса ИИБ на стоянках ЛА, смещений нулевых сигналов акселерометров и линейных трендов в них за время полета
3	Задача интеграции ИИБ–ГНСС (для горизонтальных каналов)	Определение ориентации корпуса ИИБ на траектории полета и оценок систематических погрешностей инерциальных датчиков
		Компенсация оцененных систематических погрешностей в исходных измерениях инерциальных датчиков
		Повторный расчет алгоритма интеграции. Анализ погрешностей автономного инерциального счисления ИИБ после компенсации систематических погрешностей в измерениях датчиков
4	Гравиметрическая задача	Определение оценки аномалии (или вектора) силы тяжести на траектории полета

Задача периодической стендовой калибровки аэрогравиметра

ИИБ бескарданного аэрогравиметра в сборе обязательно проходит этап стендовой калибровки на предприятии-изготовителе. В дальнейшем, при эксплуатации, необходима периодическая калибровка конкретного аэрогравиметра для проверки и поддержания заявленных производителем точностных характеристик. Известны примеры калибровок аэрогравиметров iMAR, выполнявшихся Техническим университетом Дармштадта [22].

Отметим также пример компании АО «ГНПП «Аэрогеофизика», которая в 2020 г. приобрела два бескарданных аэрогравиметра iMAR и через два года эксплуатации выполнила стендовую калибровку каждого прибора по методике, разработанной в лаборатории управления и навигации МГУ (описание методики, плана калибровочных экспериментов и алгоритмов обработки данных см., например, в [28]). Перечислим параметры калибровочной модели, которые оценивались при проведении данной калибровки [28–31]:

- смещения нулевых сигналов акселерометров и ДУС;
- взаимные перекосы осей чувствительности акселерометров и ДУС с учетом того, что приборный трехгранник ИИБ аэрогравиметра строится по осям чувствительности блока акселерометров;
- погрешности масштабных коэффициентов акселерометров и ДУС;
- разнесения чувствительных масс блока акселерометров с целью числовой реализации единого измерительно центра блока акселерометров – точки M ;
- параметры возможной взаимной рассинхронизации измерений блоков акселерометров и ДУС;

- параметры возможной взаимной рассинхронизации в гироскопических трактах;
- температурная калибровка указанных выше смещений нулевых сигналов, погрешностей масштабных коэффициентов, перекосов осей чувствительности акселерометров и ДУС в нескольких температурных точках.

На основе накопленного опыта выполненных калибровок аэрогравиметров и последующего наблюдения за качеством результатов измерений можно сделать вывод о целесообразности проведения периодических калибровок аэрогравиметров непосредственно перед новым сезоном аэрогравиметрических работ – с целью как функциональной диагностики аэрогравиметра, так и обновления базы данных калибровочных параметров.

Задачи начальной и конечной выставки ИИБ с одновременным определением смещений нулевых сигналов акселерометров

План съёмочного полета содержит этапы начальной (перед вылетом ЛА) и конечной выставок (после приземления ЛА) ИИБ аэрогравиметра (см. табл. 1). При этом полагаются известными координаты места и опорное значение силы тяжести. Задачи начальной и конечной выставок [25] решаются со следующими целями:

- автономного определения начальных значений углов курса, крена и тангажа, которые необходимы для инициализации алгоритма инерциального счисления;
- определения смещения нулевого сигнала прежде всего вертикального акселерометра и линейной составляющей его дрейфа за время полета. Если организуется режим предполетной и послеполетной калибровки блока акселерометров ИИБ, то определяются смещения нулевых сигналов (и линейные составляющие их дрейфов) всех трех акселерометров.

Особенность задач выставки в бескарданной аэрогравиметрии состоит в том, что они решаются, как правило, в условиях заметного внешнего воздействия на корпус ЛА (ветер на аэродроме, включение/выключение двигателей ЛА, регламентные работы экипажа и т.п.) [16, 32]. Алгоритм выставки при этом должен оставаться работоспособным (см. [33], где представлено описание алгоритма).

Предполетная и послеполетная калибровка блока акселерометров

При аэрогравиметрических съемках с облетом рельефа, в особенности в режиме полного его огибания (когда углы тангажа ϑ и крена γ ЛА могут достигать 30° по абсолютной величине), значимыми возмущающими факторами становятся смещения нулевых сигналов «горизонтальных» акселерометров ИИБ. Для того чтобы оценить и скомпенсировать эти смещения, на этапах начальной и конечной выставок ИИБ авторами работы предложена методика статической калибровки блока акселерометров ИИБ аэрогравиметра [33]. Калибровочный эксперимент заключается в последовательной установке аэрогравиметра на грани корпуса так, чтобы ось каждого акселерометра была по возможности сонаправлена с вертикалью места. Такая методика позволяет оценить смещения нулевых сигналов акселерометров и линейные составляющие их дрейфов. Эксперимент может быть проведен на шести гранях корпуса. В этом случае оцениваются как смещения нулевых сигналов, так и погрешности масштабных коэффициентов акселерометров.

Предполетную и послеполетную калибровку акселерометров аэрогравиметра рекомендуется осуществлять, особенно если допускаются значительные угловые эволюции ЛА на галсах съемки.

Задача экспресс-диагностики функционирования аэрогравиметра

Задача экспресс-диагностики функционирования аэрогравиметра в съемочном эксперименте важна хотя бы потому, что весьма высока стоимость каждого вылета ЛА, обеспечения его аэродромными службами, простоя ЛА из-за погодных условий и т.п. В связи с этим необходимо иметь возможность проверить, штатно или нет (и почему) функционировал аэрогравиметр во время полета. Проверку при этом следует осуществлять максимально быстро после приземления ЛА, поскольку при производственной площадной съемке полеты выполняются почти ежедневно и возможные проблемы в первичных данных аэрогравиметра (например, сбой регистрации измерений) должны быть выявлены как можно раньше, до следующего вылета, чтобы оставалось время устранить причину неполадки или принять решение о приостановке измерений.

Ниже излагается отработанная авторами технология экспресс-диагностики первичных данных аэрогравиметра и бортового приемника ГНСС (данные с базовых станций ГНСС могут быть еще недоступны после приземления ЛА):

- контроль целостности измерений инерциальных датчиков ИИБ аэрогравиметра и первичных спутниковых измерений бортового приемника ГНСС. На данном этапе проверяется наличие пропусков данных (которые, конечно, недопустимы в случае инерциальных данных) [32];
- контроль синхронизации потоков данных от ИИБ и бортового приемника ГНСС. Обычно синхронизация упомянутых потоков осуществляется на основе так называемой герцовой метки – pulse per second (PPS) – приемника ГНСС. Проверка реализуемости единой шкалы времени данных ИИБ и ГНСС весьма важна в аэрогравиметрии;
- оценка смещения нулевого сигнала прежде всего вертикального акселерометра до и после полета ЛА на этапах выставки ИИБ [32]. Эту операцию можно выполнить достаточно быстро (без решений ГНСС) и оценить параметры линейного тренда в смещении нулевого сигнала на предмет соответствия техническим требованиям к аэрогравиметру;
- расчет автономного инерциального навигационного решения для горизонтальных каналов ИИБ [25]: $\lambda(t)$, $\varphi(t)$, $V_E(t)$, $V_N(t)$, $\psi(t)$, $\vartheta(t)$, $\gamma(t)$. По численным координатам и скоростям в точке посадки несложно определить (без решений ГНСС) уровень погрешностей $\Delta\lambda(T)$, $\Delta\varphi(T)$, $\Delta V_E(T)$, $\Delta V_N(T)$ (где T – конечное время навигации) инерциального счисления на предмет их соответствия техническим требованиям к системе. Например, если после 6 часов полета накопившаяся погрешность счисления координат имеет порядок 4–6 км, то ИИБ функционировал штатно;
- анализ целостности и точности спутниковых решений бортового приемника ГНСС (проверка наличия пропусков эпох, определение среднего числа видимых спутников, статистических характеристик остаточных разностей в кодовой, доплеровской, фазовой задачах спутниковой навигации и т.п.).

Успешное прохождение указанных позиций, которое может быть выполнено достаточно оперативно, позволяет сделать вывод о кондиционности функционирования аэрогравиметра в съемочном эксперименте. Разработанное соответствующее программное обеспечение предназначено для использования операторами гравиметрических съемок, которые, как правило, не являются специалистами в области инерциальной и спутниковой навигации и алгоритмических решений в аэрогравиметрии. Модули разработанного программного пакета (QC) имеют минимальный набор управляющих параметров, не требующих специализированных знаний потребителей.

Задачи спутниковой навигации

В задаче спутниковой навигации исходными данными служат кодовые псевдодалности, доплеровские псевдоскорости, многочастотные фазовые измерения, эфемеридная информация бортового приемника ГНСС и наземных базовых станций [34].

Перечислим задачи, решаемые спутниковой частью программно-математического обеспечения бескарданного аэрогравиметра [5] в дифференциальном (при использовании как одной, так и нескольких базовых станций) и стандартном (автономном) режимах:

- определение координат λ , φ , h при помощи фазовых измерений;
- определение координат λ , φ , h при помощи кодовых измерений;
- определение компонент V_E , V_N , V_{Up} вектора относительной скорости при помощи доплеровских измерений;
- определение компонент V_E , V_N , V_{Up} вектора относительной скорости при помощи фазовых измерений;
- определение компонент a_E , a_N , a_{Up} вектора ускорения при помощи фазовых измерений.

Решения ГНСС далее применяются в разных вариантах и разных подзадачах, а именно:

- спутниковые позиционные решения λ , φ , h могут быть использованы для формирования позиционных сигналов коррекции, когда при помощи измерений ИИБ осуществляется инерциальное счисление с расчетом координат;
- спутниковые позиционные решения λ , φ , h могут быть использованы для числового моделирования поведения географического трехгранника Mx , когда его ориентация задается спутниковыми координатами λ , φ ;
- спутниковые скоростные решения V_E , V_N , V_{Up} могут быть использованы (вместе со спутниковыми координатами) для формирования скоростных сигналов коррекции, когда при помощи измерений ИИБ осуществляется инерциальное счисление с расчетом координат и скоростей;
- спутниковые скоростные решения V_E , V_N , V_{Up} могут быть использованы для формирования скоростных сигналов коррекции и для параметризации элементов модели (2), когда при помощи измерений ИИБ осуществляется инерциальное счисление с расчетом координат.

Программное обеспечение задач спутниковой навигации формирует исчерпывающий набор индикаторных характеристик решений ГНСС, позволяющих потребителю контролировать качество спутниковых данных.

Задача интеграции ИИБ–ГНСС

Задача интеграции ИИБ–ГНСС авторами решается для так называемых горизонтальных каналов инерциального счисления ИИБ (в отличие от других подходов, например [20] и [27], где задача решается одновременно для всех трех каналов). Она относится к задачам коррекции ИИБ (БИНС) по данным ГНСС (координатам, скоростям) и сводится к стандартной линейной задаче стохастического оценивания. Для ее решения (в постобработке) используется фильтр Калмана в сочетании с алгоритмом сглаживания [35]. Подробное описание используемого фильтра, его численной реализации, состава компонент фазового вектора и т.п. содержится, например, в [36], а также в [25].

Выделим особенности программной реализации алгоритма интеграции:

- фильтр Калмана в прямом времени;
- фильтр Калмана в обратном времени;
- «склейка» оценок фильтров в прямом и обратном времени [35];
- возможность выбора реализации алгоритма в разомкнутом или замкнутом вариантах, то есть в вариантах оценивания или обратных связей (см., например, [37]).

Основу алгоритма интеграции составляет модель уравнений погрешностей инерциального счисления ИИБ. В этой модели при представлении погрешности линейной скорости мы выделяем две составляющие – динамическую и кинематическую погрешности, и это принципиальный момент [25].

Состав фазового вектора задачи интеграции ИИБ–ГНСС [36]:

- $\Delta r_1, \Delta r_2$ – позиционные погрешности в горизонтальной плоскости (чаще всего в восточном и северном направлениях), м;
- $\delta V_1, \delta V_2$ – динамические скоростные погрешности в горизонтальной плоскости (чаще всего в восточном и северном направлениях), м/с;
- α_1, α_2 – угловые погрешности построения вертикали;
- β_3 – кинематическая азимутальная погрешность;
- систематические дрейфы трех ДУС;
- смещения нулевых сигналов трех акселерометров;
- три параметра смещения (в направлениях на правое крыло ЛА, в сторону носа, вверх от пола) антенны бортового приемника ГНСС относительно центра блока акселерометров ИИБ аэрогравиметра;
- позиционное τ_p и/или скоростное τ_v запаздывание данных ГНСС относительно данных ИИБ.

Типовая размерность вектора состояния равна 18.

Включение в состав фазового вектора смещений антенны приемника сигналов ГНСС и запаздываний τ_p, τ_v и их оценивание позволяют одновременно контролировать адекватность работы интеграционного фильтра и качество первичных данных аэрогравиметра.

Отметим, что при использовании алгоритма интеграции в варианте оценивания рекомендуется его двукратное применение: после первого запуска анализируются оценки систематических погрешностей инерциальных датчиков ИИБ и, в случае если они велики, осуществляется компенсация оцененных погрешностей в исходных измерениях. После этого выполняется повторный расчет алгоритма интеграции. Анализ того, насколько уменьшились погрешности инерциального счисления, позволяет судить о качестве оценивания и компенсации систематических погрешностей ИИБ. Благодаря такому подходу можно контролировать стабильность оценок

систематических погрешностей и величин погрешностей автономного инерциального счисления ИИБ от вылета к вылету на протяжении съемки, а также следить за тем, требуется ли упомянутая выше периодическая стендовая калибровка ИИБ.

Задачи оценивания гравитационной аномалии и вектора возмущения силы тяжести

Последним этапом постобработки аэрогравиметрической информации является собственно задача аэрогравиметрии, состоящая в оценивании компонент вектора возмущения силы тяжести – одной вертикальной (гравитационной аномалии) или всех трех (аномалии и двух горизонтальных компонент). Результаты предыдущей обработки первичных данных, таким образом, подготавливают проверенную, очищенную от возможных сбоев, синхронизированную информацию для решения основной задачи – гравиметрической.

При решении гравиметрической задачи выделяются четыре направления. Первые два связаны со способом построения навигационных решений ИИБ.

1. В качестве опорной используется модель инерциального счисления (1)–(3) с расчетом географических координат λ , φ , h , компонент V_E , V_N , V_{Up} вектора линейной относительной скорости в осях географического трехгранника Mx , ориентированного по сторонам света (возможная иная азимутальная ориентация Mx , например относительно свободная [25], здесь не рассматривается), и углов ориентации корпуса ИИБ – истинного курса ψ , тангажа ϑ , крена γ . При этом используется демпфирование экспоненциально неустойчивого вертикального канала при помощи высоты ГНСС. Далее такое решение применяется в соответствующих задачах интеграции ИИБ–ГНСС и оценивания гравитационной аномалии.
2. В качестве опорной применяется модель счисления (2)–(3) без инерциального расчета географических координат λ , φ , h . Соответствующие модели сводятся к интегрированию показаний акселерометров, спроектированных (при помощи данных ДУС) на оси «спутникового» географического трехгранника, построенного с использованием решений ГНСС. Результатом счисления являются компоненты вектора линейной относительной скорости V'_E , V'_N , V'_{Up} . Далее это решение задействуется при составлении корректирующей информации в задаче «скоростной» интеграции ИИБ–ГНСС (то есть не содержащей позиционной группы уравнений) и оценивания гравитационной аномалии.

Другие два направления связаны с решением задачи либо скалярной, либо векторной аэрогравиметрии. Для каждого из них используются свои модели, методы и алгоритм решения. Опишем кратко оба направления.

Задача скалярной аэрогравиметрии

Требуется оценить аномалию силы тяжести на траектории ЛА по данным аэрогравиметра – показаниям трех акселерометров (с учетом оцененных смещений нулевых сигналов и линейных трендов в них), данным ГНСС (координатам, скоростям) и углам ориентации корпуса ИИБ (оцененным на этапе интеграции ИИБ–ГНСС). Опорным является основное уравнение скалярной аэрогравиметрии [5, 38], дополненное той или иной моделью нормальной силы тяжести, например (4).

Основное уравнение решается как стандартная линейная задача оптимального стохастического оценивания. Оцениваемые величины – аномалия и ряд калибровочных параметров аэрогравиметра, к которым отнесем [5]:

- остаточные угловые погрешности определения вертикали;
- параметр, характеризующий возможную рассинхронизацию измерений вертикального акселерометра ИИБ и данных ГНСС;
- поправку масштабного коэффициента вертикального акселерометра ИИБ;
- поправки к измеренным смещениям антенны ГНСС относительно центра ИИБ аэрогравиметра.

При этом вводятся априорные стохастические модели для аномалии (в виде стационарного случайного процесса от времени полета) и калибровочных параметров (в виде констант или медленно меняющихся функций времени) [5, 8, 21]. Задача оценивания решается при помощи фильтра Калмана и алгоритма сглаживания, реализованного в виде алгоритма RTS на основе QR-разложения [35] (однако возможны и другие численные реализации – например, в виде алгоритма Брайсона–Фрейзера и т.п. [1, 35]). Результатом решения являются сглаженная оценка аномалии силы тяжести на траектории полета и оценки калибровочных параметров аэрогравиметра (рис. 1), которые в частности служат индикаторными характеристиками качества решения задачи аэрогравиметрии (наряду с величинами невязок оценивания аномалии в фильтре Калмана).

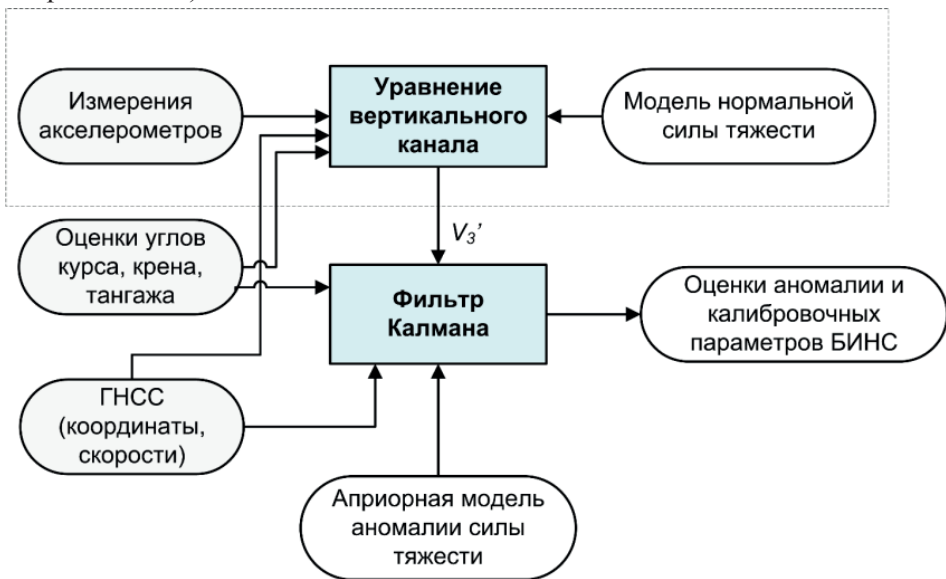


Рис. 1. Схема алгоритма оценивания аномалии силы тяжести по измерениям бескарданного аэрогравиметра

Задача векторной аэрогравиметрии

Требуется оценить все три компоненты вектора возмущения силы тяжести – вертикальную (аномалию) и горизонтальные (пропорциональны отклонениям отвесной линии) на траектории ЛА по данным бескарданного аэрогравиметра, перечисленным в предыдущем подразделе. Приведем краткое описание разработанного алгоритма решения задачи [5, 39].

В рассматриваемом подходе задача базируется, как и выше, на основном уравнении аэрогравиметрии и сводится к решению задачи оптимального стохастического оценивания. При этом в качестве априорной модели аномалии используется пространственная модель на основе параметризации локального возмущающего потенциала в районе полета локализованными в пространстве радиальными базисными функциями (гармоническими сферическими скейлинг-функциями Абеля–Пуассона) [40]. Функции такого типа составляют основу техники вейвлет-разложения на сфере [40] и применяются при решении задач спутниковой гравиметрии и комбинировании разнородных гравиметрических данных [1, 7, 41–42].

В результате применения указанных базисных функций в векторной аэрогравиметрии появляется возможность построить априорную пространственную модель поля силы тяжести, с тем чтобы за счет дополнительной информации о пространственных свойствах поля в районе полета (игнорируемой при использовании традиционных априорных моделей во времени) отделить систематические погрешности ИИБ аэрогравиметра от геофизического сигнала (подробнее см. [43]).

Фазовый вектор состояния решаемой задачи включает [39] набор коэффициентов параметризации поля (количество которых может достигать нескольких сотен) в районе полета и набор калибровочных параметров аэрогравиметра. При этом предполагается, что полет проходит по нескольким галсам. Алгоритм решения задачи – фильтр Калмана в информационной форме с регуляризацией. Этот вариант фильтра выбран из-за плохой обусловленности матриц ковариации на большинстве шагов рекурсии из-за ненаблюдаемости коэффициентов параметризации поля, отвечающих дальним базисным функциям. Результатом алгоритма служат оценки калибровочных параметров аэрогравиметра и оценки коэффициентов параметризации возмущающего потенциала, по которым далее по стандартным формулам дифференцирования [26] вычисляются оценки компонент вектора возмущения силы тяжести на галсах.

Отметим также альтернативный алгоритм решения задачи векторной аэрогравиметрии [44], основанный на аналогичной идее (учете пространственной информации о поле), но использующий другую априорную модель потенциала – в виде двумерной авторегрессии на плоскости в районе полета.

Результаты обработки данных



Рис. 2. Аэрогравиметр iMAR на борту Ан-30 (фото ГНПП «Аэрогеофизика»)

Разработанная методика проведения аэрогравиметрической съемки и постобработки первичных данных бескарданных аэрогравиметров была опробована в 2020–2022 гг. на данных нескольких съемок (общим объемом более 80 тыс. пог. км), выполненных на разных носителях при использовании современных бескарданных аэрогравиметров (рис. 2). Точность полученных результатов – оценок аномалий силы тяжести – сопоставима с точностью традиционной платформенной аэрогравиметрии (при измерении в спокойных динамических условиях) [3, 5, 16, 17, 45].

На рис. 3 приведен фрагмент карты с результатами обработки одной из съемок (2021 г.). Использовались аэрогравиметр iMAR и самолет Ан-30. Съемка выполнена в режиме облета рельефа. Точность оценивания аномалий силы тяже-

сти, рассчитанная по невязкам в точках пересечения рядовых и опорных галсов, составила 2,0 мГал (СКО), пространственное разрешение оценок вдоль галсов – 4,2 км (рассчитано по частоте среза гравиметрического фильтра и средней скорости ЛА на галсе).

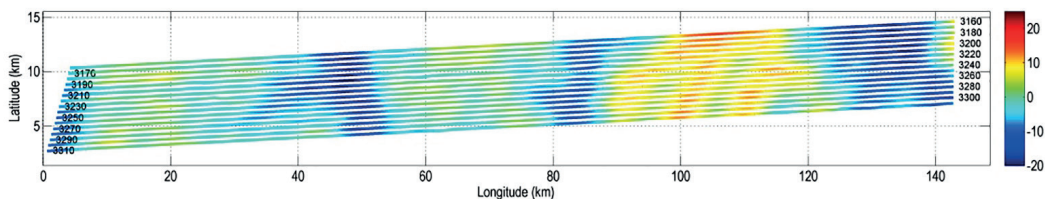


Рис. 3. Оценки аномалии силы тяжести на галсах съемки (фрагмент), полученные по измерениям бескарданного аэрогравиметра, мГал

Были также выполнены съемки на легких носителях – беспилотном ЛА (рис. 4–5) и самолете Ан-3Т (рис. 6). Применение легких носителей позволило за счет малой скорости полета достичь высокого пространственного разрешения оценок аномалии – 1,6 км при съемке на беспилотном ЛА и 2,5 км при съемке на Ан-3Т. Точность оценивания аномалии в первой съемке составила 0,45 мГал (СКО по четырем повторным галсам на постоянной высоте). Во второй съемке (Ан-3Т) – 2,3 мГал (по невязкам в точках пересечения галсов) [3, 16], при этом измерения выполнялись в режиме полного огибания рельефа: кажущиеся ускорения, измеряемые вертикальным акселерометром аэрогравиметра (iMAR), достигали 2,5 g. Насколько известно, съемка в таких динамических условиях в аэрогравиметрии была проведена впервые в мировой практике.



Рис. 4. Беспилотный летательный аппарат (БАС-200) с прикрепленным бескарданным аэрогравиметром (фото ГНПП «Аэрогеофизика»)

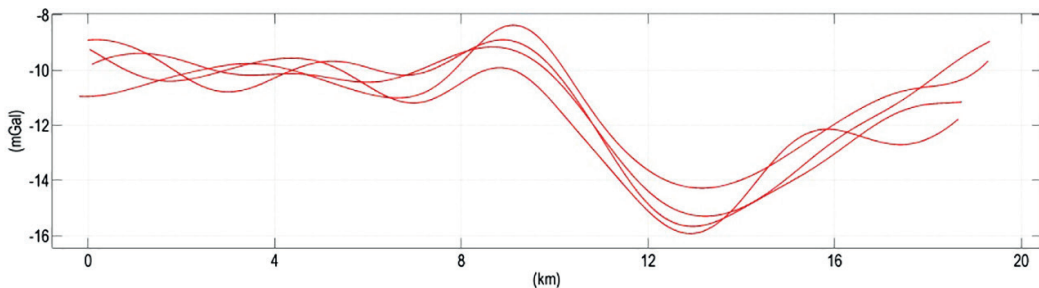


Рис. 5. Оценки аномалии силы тяжести на повторных галсах в съемке на беспилотном летательном аппарате, мГал

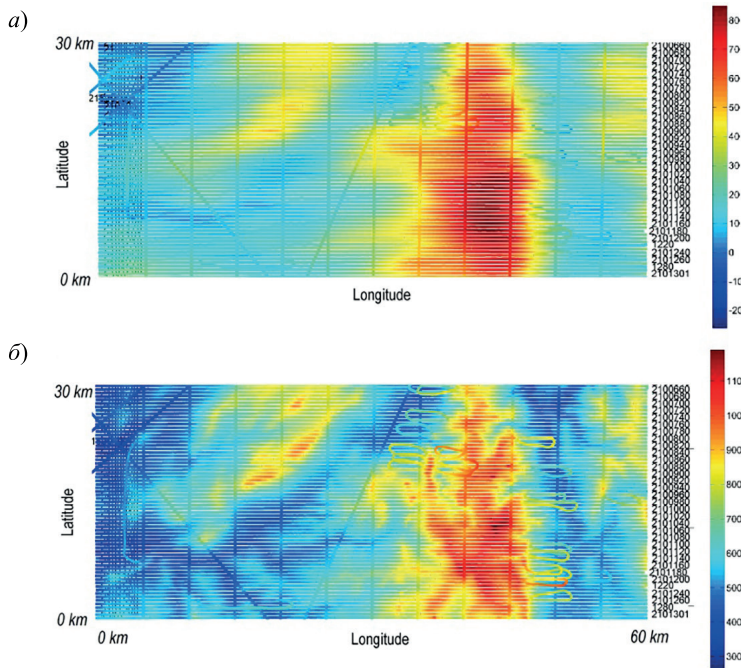


Рис. 6. Результаты съемки на Ан-3Т: *a* – оценки аномалии силы тяжести на галсах, мГал; *b* – высота полетов на галсах (данные ГНСС), м

Отметим, что в одной из съемок [5] оценивались также горизонтальные компоненты вектора силы тяжести (использовался алгоритм на основе априорной пространственной модели поля силы тяжести). Точность результатов оценивания определялась путем сравнения с данными глобальной модели гравитационного поля Земли (EGM2008) и составила 2-3 мГал (СКО) [5].

Заключение

В статье описывается разработанная методика подготовки и проведения аэрогравиметрических съемок при использовании бескарданных аэрогравиметров, структурированы задачи постобработки первичных данных. Отражены вопросы создания и применения программно-математического обеспечения постобработки, когда в качестве основного источника информации служат показания инерциальных датчиков аэрогравиметра и первичные измерения приемников ГНСС.

Рассмотрены вопросы экспресс-диагностики и контроля качества первичной информации. Приведены типовые циклограммы полетов и обработки данных бескарданных аэрогравиметров. Изложены два направления (с описанием соответствующих алгоритмов) в решении аэрогравиметрической задачи – оценивание гравитационной аномалии и вектора возмущения силы тяжести.

Материал статьи основан на накопленном авторами опыте обработки данных бескарданных аэрогравиметров разных производителей в ходе съемок на различных носителях (самолетах и беспилотных летательных аппаратах).

Авторы благодарны рецензентам В.Н. Конешову и О.А. Степанову за ценные замечания и предложения по улучшению содержания статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Современные методы и средства** измерения параметров гравитационного поля Земли / под ред. В.Г. Пешехонова, О.А. Степанова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
2. **Пешехонов В.Г., Степанов О.А., Розенцвейн В.Г., Краснов А.А., Соколов А.В.** Современное состояние разработок в области бесплатформенных инерциальных аэрогравиметров // Гироскопия и навигация. Т. 30. №4 (119). 2022. С. 3–35. DOI 10.17285/0869-7035.00101.
3. **Бабаянц П.С., Бровкин Г.И., Контарович Г.И., Голован А.А., Вязьмин В.С.** Методические особенности современных аэрогравиметрических съемок // Сб. материалов XXXIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2022. С. 154–156.
4. **Berzhitsky, V.N., Ermakov, M.A., Pyin, V.N., Smoller, Yu.L., Yurist, S.Sh., Bolotin, Yu.V., Golovan, A.A., Parusnikov, N.A., et al.** Airborne strapdown gravimeter GT-X, *Proceedings of IAG Symposium «Terrestrial gravimetry: static and mobile measurements»*, St. Petersburg, 2010, pp. 20–24.
5. **Вязьмин В.С., Голован А.А., Болотин Ю.В.** Новые алгоритмы бескарданной аэрогравиметрии: проверка на экспериментальных данных // Сб. материалов XXVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2021. С. 48–55.
6. **Голован А.А., Болотин Ю.В., Парусников Н.А.** Математические модели аэрогравиметрической системы на базе корректируемого гироскопического блока // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. 2003. Т. 4. С. 4–12.
7. **Болотин Ю.В., Вязьмин В.С.** Методы l_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. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.3.082-094.
8. **Bolotin, Y.V., Golovan, A.A.,** Methods of inertial gravimetry, *Moscow University Mechanics Bulletin*, 2013, 68(5): 117–125, <https://doi.org/10.3103/S0027133013050026>.
9. **Golovan, A.A., Klevtsov, V.V., Koneshov, I.V., et al.,** Application of GT-2A Gravimetric Complex in the Problems of Airborne Gravimetry, *Izv., Phys. Solid Earth*, 2018, 54, 658–664, <https://doi.org/10.1134/S1069351318040043>.
10. **Vyazmin, V.S., Bolotin, Y.V., Smirnov, A.O.,** Improving Gravity Estimation Accuracy for the GT-2A Airborne Gravimeter Using Spline-Based Gravity Models, *International Association of Geodesy Symposium*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2020, pp. 1–8, https://doi.org/10.1007/1345_2020_112.
11. **Бержицкий В.Н., Болотин Ю.В., Голован А.А., Ильин В.Н., Парусников Н.А., Смоллер Ю.Л., Юрист С.Ш. и др.** Инерциально-гравиметрический комплекс МАГ-1 (GT-1A). Опыт разработки и результаты летных испытаний // Гироскопия и навигация. 2002. Т. 38, № 3. С. 104–116.
12. **Olson, D.,** GT-1A and GT-2A airborne gravimeters: improvements in design, operation, and processing from 2003 to 2010, *Proceedings of the ASEG-PESA airborne gravity 2010 workshop*, Sydney, Australia. 2010.
13. **Лаборатория управления и навигации МГУ** [Электронный ресурс]. URL: <http://navlab.ru>.
14. **iMAR** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.imar-navigation.de>.
15. **АО «ГНПП «Аэрогеофизика»** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aerogeo.ru>.
16. **Вязьмин В.С., Голован А.А., Болотин Ю.В., Бровкин Г.И., Контарович О.Р.** Технологии и результаты обработки первичных данных бескарданного аэрогравиметра в площадных съемках с облетом рельефа на разных носителях // Сб. материалов XXXIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2022. С. 157–161.
17. **Бровкин Г.И., Контарович О.Р., Голован А.А., Вязьмин В.С.** Результаты первой в России аэрогравиметрической съемки с бесплатформенным гравиметром // Сб. материалов IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия-2021. Георазведка в современных реалиях». Т. 2. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2021. С. 107–111.
18. **Краснов А.А., Соколов А.В., Элинсон Л.С.** Новый аэроморской гравиметр серии «Чекан» // Гироскопия и навигация. 2014. №1. С. 26–34.
19. **Sander, S., Argyle, M., Elieff, S., Ferguson, S., Lavoie, V., Sander, L.** The AIRGrav airborne gravity system, *Recorder*, 2005, 30, 49–54.
20. **Jensen, T.E., Forsberg, R.,** Helicopter Test of a Strapdown Airborne Gravimetry System, *Sensors*, 2018, 18, 3121, doi:10.3390/s18093121.

21. Степанов О.А., Кошаев Д.А., Моторин А.В. Идентификация параметров модели аномалии в задаче авиационной гравиметрии методами нелинейной фильтрации // *Гироскопия и навигация*. 2015. № 3 (90). С. 95–101. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.3.095-101.
22. Becker, D., Advanced calibration methods for strapdown airborne gravimetry, Ph.D. Thesis, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2016.
23. Simav, M., Becker, D., Yildiz, H., Hoss, M., Impact of temperature stabilization on the strapdown airborne gravimetry: a case study in Central Turkey, *J. Geod.*, 2020, 94, 41, <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01369-5>.
24. Cao, J., Wang, M., Cai, S., Zhang, K., Cong, D., Wu, M., Optimized design of the SGA-WZ strapdown airborne gravimeter temperature control system, *Sensors*, 2015, 15, 29984–29996, doi:10.3390/s151229781.
25. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы инерциальных навигационных систем. М.: Изд-во Московского университета, 2020, 164 с.
26. Торге В. Гравиметрия. М.: Мир, 1999, 429 с.
27. Jekeli, C., Kwon, J.H., Results of Airborne Vector (3-D) gravimetry, *Geoph. Res. Lett.*, 1999, 26(23): 3533–3536.
28. Вавилова Н.Б., Васинева И.А., Голован А.А., Козлов А.В., Папуша И.А., Парусников Н.А. Калибровка в инерциальной навигации // *Фундаментальная и прикладная математика*. 2018. 22:2. 89–115.
29. Kozlov, A.V., Kapralov, F.S., Fomichev, A.V., Calibration of a timing skew between gyroscope measurements in a strapdown inertial navigation system, *26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems Proceedings*, St. Petersburg, 2019, pp. 241–245, doi: 10.23919/ICINS.2019.8769417.
30. Kozlov, A.V., Kapralov, F.S., Millimeter-level calibration of imu size effect and its compensation in navigation grade system, *DGON Inertial Sensors and Systems Proceedings*, Piscataway, NJ, United States, 2019, pp. P10.1–P10.12, doi: 10.1109/ISS46986.2019.8943630.
31. Tarygin, I.E., Kozlov, A.V., Calibration of inertial measurement unit with simultaneous estimation of the temperature time-derivative variations, *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 715–723.
32. Говоров А.Д., Вязьмин В.С., Шаронов А.В. Предполетная калибровка блока акселерометров и контроль целостности первичных данных бескарданного гравиметра // Сб. докладов XXXIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. С. 161–165.
33. Вязьмин В.С., Голован А.А., Говоров А.Д. Начальная и конечная выставки бескарданного аэрогравиметра с определением смещений нулевых сигналов акселерометров // *Гироскопия и навигация*. 2023. Т. 31. №1 (120). С. 76–88.
34. Golovan, A.A., Vavilova, N.B., Satellite navigation. Raw data processing for geophysical applications, *J. Math. Sci.*, 2007. 146(3):5920–5930.
35. Kailath, T., Sayed, A. H., Hassibi, B., *Linear estimation*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 2000.
36. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Козлов А.В., Папуша И.А., Зорина О.А., Измайлов Е.А., Кухтевич С.Е., Фомичев А.В. Интеграция спутниковой и инерциальной навигационных систем с учетом рассинхронизации данных и смещения спутниковой антенны. Опыт практической реализации // *Гироскопия и навигация*. Т. 29. №3 (114), 2021. С. 52–68.
37. Емельянцева Г.И., Степанов А.П. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / под общей ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. 394 с.
38. Stepanov, O.A., Koshaev, D.A., Analysis of filtering and smoothing techniques as applied to aerogravimetry, *Gyroscopy and Navigation*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 19–25.
39. Vyazmin, V.S., New algorithm for gravity vector estimation from airborne data using spherical scaling functions, *International Association of Geodesy Symposia*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2020, pp. 1–7, https://doi.org/10.1007/1345_2020_113.
40. Freedon, W., Michel, V., *Multiscale potential theory (With applications to geoscience)*, Birkhauser Verlag, Basel, 2004.
41. Klees, R., Tenzer, R., Prutkin, I., Wittwer, T., A data-driven approach to local gravity field modelling using spherical radial basis functions, *J. Geod.*, 2008, 82:457–471.
42. Eicker, A., Gravity Field Refinement by Radial Basis Functions from In-Situ Satellite Data, Ph.D. Thesis, University of Bonn, Bonn, Germany, 2008.
43. Bolotin Y.V., Vyazmin V.S., Spectral analysis of the airborne vector gravimetry problem, *J. Math. Sci.*, 2021, vol. 253, no. 6, pp. 778–795, doi: 10.1007/s10958-021-05269-7.

44. Vyazmin, V.S., Bolotin, Y.V., Two-dimensional Kalman filter approach to airborne vector gravimetry, *Journal of Geodetic Science*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 87–96, doi: 10.1515/jogs-2019-0009.
45. Могилевский В.Е., Бровкин Г.И., Смирнов А.С., Прозорова Г.В. Оценка погрешности данных аэрогравиметрической съемки // Мониторинг. Наука и технологии. 2018. Т. 36. № 3. С. 6–17.
-

Golovan, A.A. and Vyazmin, V.S. (Lomonosov Moscow State University, Russia)

Methodology of Airborne Gravimetry Surveying and Strapdown Gravimeter Data Processing, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2023, vol. 31, no. 1 (120), pp. 58–75.

Abstract. The paper presents a methodology of preparing and conducting airborne gravimetry survey using an inertial measuring unit (IMU) or strapdown inertial navigation system as an airborne gravimeter. We also discuss the key aspects of developing appropriate postprocessing algorithms and software and their application to processing raw gravimeter data. When solving the strapdown inertial airborne gravimetry problem, we use readings of the IMU sensors (accelerometers and gyroscopes) as primary information. The second no less important information is the raw (pseudorange, Doppler pseudorange rate, and carrier phase) measurements from the GNSS receivers onboard the aircraft and on the ground. The developed methodology, algorithms, and practical recommendations presented in the paper are based on the authors' long-term experience in airborne gravimetry.

Key words: airborne gravimetry, strapdown gravimeter, gravity vector, IMU, GNSS, postprocessing, estimation, Kalman filter.

Материал поступил 22.02.2023