

УДК 528.27

Анализ результатов моделирования работы бесплатформенного гравиинерциального навигационного комплекса

А.А. Афонин, А.В. Репников, А.С. Сулаков, Г.Г. Ямашев

Аннотация

В работе приведены состав, основные алгоритмы работы и характеристики перспективного аэроморского малогабаритного бесплатформенного гравиинерциального навигационного комплекса. Представлены результаты имитационного и полунатурного моделирования его работы. Показано, что ожидаемые метрологические характеристики комплекса соответствуют потребностям современной аэроморской гравиметрии.

Ключевые слова:

бесплатформенный гравиинерциальный навигационный комплекс; векторные гравиметрические измерения; ускорение силы тяжести; спутниковая навигационная система; бесплатформенная инерциальная навигационная система; оценка аномалии

Введение

Как известно, мобильная гравиметрия является одним из важнейших этапов при поиске и разведке залежей полезных ископаемых, в том числе углеводородных соединений, которыми богаты шельфовые зоны морей и океанов. Вместе с тем результаты гравиметрических исследований необходимы при решении ряда актуальных задач геодезии, геофизики, навигации и др. в целях повышения экономического, научно-технического и оборонного потенциала страны. Несмотря на это, развитие аэроморской гравиметрии происходит «экстенсивно», в основном за счет совершенствования используемых видов оборудования. При этом общая концепция проведения мобильной гравиметрии не меняется на протяжении десятков лет. В связи с этим в настоящее время во всем мире большое

внимание уделяется развитию гравиинерциальных технологий в целях повышения эффективности мобильных гравиметрических измерений [1].

К главным достоинствам традиционной гравиметрии на подвижном основании следует отнести: достигнутый высокий уровень отработанности и отлаженности технологии, а также приемлемую точность (0,1 – 2 мГал) для большинства поставленных перед аэроморской гравиметрией задач. При этом к основным недостаткам современной мобильной гравиметрии относятся излишне большие масса-габаритные характеристики применяемого оборудования, высокое энергопотребление, очень большая стоимость, что связано с необходимостью установки гравиметрического датчика на гиросtabilизированную платформу для его выставки по истинной вертикали места. В свою очередь это вызывает необходимость применения в качестве аппаратов-носителей среднетоннажных судов, самолетов и вертолетов среднего класса, достаточной грузоподъемности и ограниченной маневренности, что снижает производительность, детальность и оперативность, резко увеличивает затраты на мобильные гравиметрические измерения. Преодолеть указанные недостатки, свойственные современной гравиметрии, можно посредством создания малогабаритного бесплатформенного гравиметрического комплекса без использования гиросtabilизатора, что позволит проводить гравиметрическую съемку с бортов малоразмерных автономных автоматизированных подводных и летательных аппаратов.

На кафедре «Автоматизированные комплексы систем ориентации и навигации» МАИ на протяжении ряда лет активно разрабатывается концепция мобильных векторных гравиметрических измерений посредством бесплатформенного гравиинерциального навигационного комплекса (БГНК) [2] малоразмерного подводного аппарата (МПА) или беспилотного летательного аппарата (БЛА). Общая функциональная схема комплекса, определяющая его базовый состав, представлена на рис. 1.

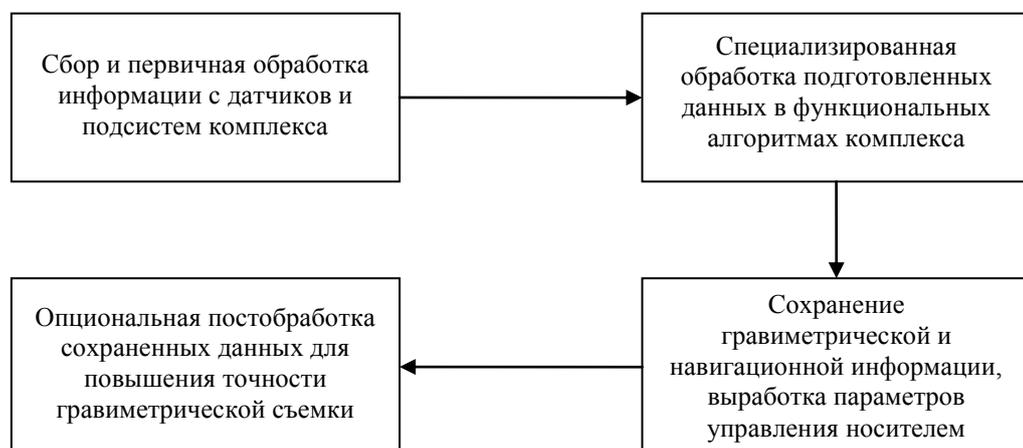


Рисунок 1 – Функциональная схема БГНК

Структура БГНК предполагает наличие ряда датчиков первичной информации, а также информационно-измерительных подсистем. Ядром такого комплекса является инерциальный измерительный блок в составе датчиков кажущегося ускорения (прецизионные навигационные акселерометры) и датчиков абсолютной угловой скорости (гироскопы). В составе БГНК также должны быть: навигационная аппаратура потребителя спутниковой навигационной системы (СНС) (GPS, ГЛОНАСС), работающей в дифференциальном или фазовом режиме либо приемник/передатчик аналогичной позиционной системы (включая возможности технологий СНС под водой [3]), а также опционально: глубиномер/высотомер, для высокоточного (до единиц см) определения глубины погружения/высоты над уровнем моря МПА (БЛА) с целью коррекции вертикального канала инерциальной системы и высотной (глубинной) привязки гравиметрических измерений; акселерометрический построитель вертикали (в основном применительно к МПА в режимах зависания и равномерного хода на глубине, а также к БЛА на стартовой позиции), реализованный посредством алгоритмической обработки сигналов с блока акселерометров (БА), позволяющий с секундной точностью осуществлять коррекцию параметров ориентации относительно плоскости горизонта; доплеровский измеритель скорости или лаг того или иного вида, предоставляющие информацию об относительной скорости; ориентационная глубиномерная система [4], построенная на базе разнесенных глубиномеров, определяющая непосредственно параметры ориентации МПА (по разности измеренных глубин разнесенными глубиномерами, установленными на МПА); магнитометрическая/гироскопическая курсовая система и др. В составе комплекса также должны быть блоки предварительной обработки информации, вычислительный комплекс, решающий основную функциональную задачу БГНК (определение параметров ориентации, навигации, гравиметрии и управления), обеспечивающий соответствующими данными основных потребителей, в том числе систему автоматического управления носителя, а также блок хранения и (проводной/беспроводной) передачи информации.

Алгоритмы БГНК

Решение гравиметрической задачи (определение аномалии ускорения силы тяжести) бесплатформенным комплексом может быть основано, например, на принципах комплексной обработки информации, реализованной на методах оптимальной калмановской фильтрации. При этом методика определения аномалии основывается на ее «неявном» внесении в вектор

состояния системы и реализации алгоритма его оценивания [5,6]. В то же время в алгоритме БГНК непосредственно оцениваются погрешности определения проекций аномалии. При этом в качестве опорных используются априорные заранее известные с ограниченной точностью значения этих проекций аномалии вдоль маршрута МПА (БЛА), погрешности данных априорных значений относительно истинных собственно и оценивается. В наиболее простом случае их можно положить, например, нулевыми, тогда измеренные в итоге комплексом проекции аномалии будут равны полученным в ходе работы алгоритма оценивания оценкам ошибок проекций аномалии вдоль маршрута, взятым с противоположным знаком.

Основу программно-алгоритмической части комплекса составляет алгоритм автономного определения параметров ориентации (1):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\Lambda} &= 0,5 \begin{pmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{pmatrix} \Lambda; \\ \mathbf{A}_{O/E} &= \begin{pmatrix} \cos(u_0 t) & \sin(u_0 t) & 0 \\ -\sin(u_0 t) & \cos(u_0 t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 2\lambda_0^2 - 1 + 2\lambda_1^2 & 2\lambda_1\lambda_2 + 2\lambda_0\lambda_3 & 2\lambda_1\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_2 \\ 2\lambda_2\lambda_1 - 2\lambda_0\lambda_3 & 2\lambda_0^2 - 1 + 2\lambda_2^2 & 2\lambda_2\lambda_3 + 2\lambda_0\lambda_1 \\ 2\lambda_3\lambda_1 + 2\lambda_0\lambda_2 & 2\lambda_3\lambda_2 - 2\lambda_0\lambda_1 & 2\lambda_0^2 - 1 + 2\lambda_3^2 \end{bmatrix}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

и навигации (2):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{U}} &= -2\mathbf{u} \times \mathbf{U} + \mathbf{A}_{O/E} \mathbf{n}_O + \mathbf{g}_{\text{ГН}} + \mathbf{A}; \\ \dot{\mathbf{R}} &= \mathbf{U}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\Lambda = [\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$; $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – параметры Родрига-Гамильтона; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции абсолютной угловой скорости МПА (БЛА), измеряемые блоком гироскопов (БГ), на оси

связанной системы координат (ССК); $\mathbf{A}_{O/E} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$ – матрица ориентации ССК

относительно базовой – Земной экваториальной системы координат (ЭСК) [2] (начало O – в центре Земли, ось $O\xi$ лежит на линии пересечения плоскости экватора с Гринвичским меридианом, ось $O\zeta$ направлена по вектору угловой скорости вращения Земли); \mathbf{U} – вектор относительной скорости подвижного объекта; \mathbf{u} – вектор угловой скорости вращения Земли, u_0 – его модуль; \mathbf{n} – вектор кажущегося ускорения подвижного объекта; индексом o обозначаются вектора, представленные в проекциях на оси ССК (без данного индекса – на оси ЭСК); $\mathbf{g}_{\text{ГН}}$ – нормальный вектор ускорения силы тяжести (УСТ); \mathbf{A} – вектор аномалии УСТ; \mathbf{R} – геоцентрический радиус-вектор местоположения МПА (БЛА).

где θ – вектор малого поворота, характеризующий уход вычисленной системы координат (ВСК) относительно базовой; δ обозначает погрешность соответствующей величины; индексы ξ, η, ζ и x, y, z обозначают проекции соответствующих векторов на оси ЭСК и ССК соответственно; ω_0 – собственная частота бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) при движении МПА (БЛА) в небольшой удаленности от поверхности Земли, обычно называемая частотой М. Шулера; индекс $сл$ обозначает для соответствующих величин их случайные составляющие, как правило, описываемые корреляционными функциями первого и второго порядка или др. способами; $\Delta\omega_x, \Delta\omega_y, \Delta\omega_z$ – дрейфы гироскопов; $\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z$ – погрешности акселерометров; индекс $сист$ обозначает систематическую ошибку соответствующего параметра; индекс $с$ отвечает параметру, вычисляемому СНС; $\mu_{\xi, \eta, \zeta}$ – коэффициенты затухания корреляционных функций; $\sigma_{\xi, \eta, \zeta}$ – СКО случайных составляющих аномалии УСТ; $l_{R_\xi}, l_{R_\eta}, l_{R_\zeta}$ – проекции орта $\mathbf{I}_R = \mathbf{R}(\mathbf{R} \cdot \mathbf{R})^{-0,5}$ геоцентрической вертикали.

Для рассматриваемого вектора состояния при условии некоррелированных между собой соответствующих погрешностей матрицы \mathbf{Q} и \mathbf{L} являются симметричными неотрицательно-определенной и положительно-определенной следующего вида:

$$\mathbf{Q} = \text{diag} \left(\left(\sigma_{\Delta\omega_{x,б.ш.}}^2, \sigma_{\Delta\omega_{y,б.ш.}}^2, \sigma_{\Delta\omega_{z,б.ш.}}^2, \sigma_{\Delta n_{x,б.ш.}}^2, \sigma_{\Delta n_{y,б.ш.}}^2, \sigma_{\Delta n_{z,б.ш.}}^2 \right)^T \right),$$

где $\text{diag}(\mathbf{x})$ – диагональная матрица, составленная из элементов вектора \mathbf{x} ; $\sigma_{\Delta\omega_{x,y,z,б.ш.}}, \sigma_{\Delta n_{x,y,z,б.ш.}}$ – СКО случайных составляющих погрешностей гироскопов и акселерометров, описываемых белыми шумами,

$$\mathbf{L} = \text{diag} \left(\left(\sigma_{\delta R_{\xi,сб.ш.}}^2, \sigma_{\delta R_{\eta,сб.ш.}}^2, \sigma_{\delta R_{\zeta,сб.ш.}}^2, \sigma_{\delta U_{\xi,сб.ш.}}^2, \sigma_{\delta U_{\eta,сб.ш.}}^2, \sigma_{\delta U_{\zeta,сб.ш.}}^2 \right)^T \right),$$

где $\sigma_{\delta R_{\xi,\eta,\zeta,сб.ш.}}, \sigma_{\delta U_{\xi,\eta,\zeta,сб.ш.}}$ – СКО случайных составляющих погрешностей СНС в определении проекций геоцентрического радиус-вектора и относительной скорости на оси ЭСК, описываемых белыми шумами.

Начальная матрица ковариации \mathbf{P}_0 задается элементами:

$$\mathbf{P}_0 = \text{diag} \{ \sigma_\theta^2, \sigma_\theta^2, \sigma_\theta^2, \sigma_{\delta U}^2, \sigma_{\delta U}^2, \sigma_{\delta U}^2, \sigma_{\delta R}^2, \sigma_{\delta R}^2, \sigma_{\delta R}^2, \sigma_{\Delta n}^2, \sigma_{\Delta n}^2, \sigma_{\Delta n}^2, \sigma_{\Delta\omega}^2, \sigma_{\Delta\omega}^2, \sigma_{\Delta\omega}^2, \sigma_{\Delta R_c}^2, \sigma_{\Delta R_c}^2, \sigma_{\Delta R_c}^2, \sigma_{\Delta U_c}^2, \sigma_{\Delta U_c}^2, \sigma_{\Delta U_c}^2, A_{\max}^2, A_{\max}^2, A_{\max}^2, \sigma_\xi^2, \sigma_\eta^2, \sigma_\zeta^2 \},$$

где σ_θ – СКО ошибки начальной выставки по ориентации; $\sigma_{\delta U}, \sigma_{\delta R}$ – СКО ошибок начальной выставки по определению скорости и местоположения; $\sigma_{\Delta n}, \sigma_{\Delta\omega}$ – СКО реализаций систематических погрешностей акселерометров и гироскопов; $\sigma_{\Delta R_c}, \sigma_{\Delta U_c}$ – СКО реализаций

систематических составляющих погрешностей СНС в определении координат и скоростей; A_{\max} – максимальное ожидаемое значение проекций аномалии в начальный момент времени в исследуемом регионе.

Результаты имитационного моделирования

Имитационное моделирование работы БГНК проведено согласно схеме, представленной на рис. 2, в различных режимах движения подвижного объекта при различных уровнях внешних возмущающих воздействий. При этом моделирование проводилось как в виртуальной компьютерной среде Mathcad, так и с использованием языка программирования C++.



Рисунок 2 – Блок-схема имитационного моделирования работы БГНК

Проведенный анализ наблюдаемости системы при отсутствии движения объекта относительно Земли показал, что для вектора состояния (4), состоящего из 27 элементов, ранг матрицы наблюдаемости равен 15. При этом ряд параметров наблюдается в комбинации. Для наглядности и простоты восприятия ниже описана взаимосвязь ошибок БГНК, преобразованных из ЭСК и ССК в географическую систему координат (ГСК). Установлено, что в сложных комбинациях наблюдаются: погрешность БИНС и систематическая погрешность СНС в определении координаты вдоль восточного направления, систематическая погрешность определения восточной проекции кажущегося

ускорения и систематическая и случайная ошибки определения восточной составляющей аномалии УСТ, северная и вертикальная составляющие θ и систематическая погрешность определения восточной составляющей абсолютной угловой скорости; погрешность БИНС и систематическая погрешность СНС в определении координаты вдоль северного направления, систематическая погрешность определения северной проекции кажущегося ускорения и систематическая и случайная ошибки определения северной составляющей аномалии УСТ, восточная составляющая θ , систематические погрешности определения северной и вертикальной составляющих абсолютной угловой скорости; погрешность БИНС и систематическая погрешность СНС в определении координаты вдоль вертикального направления, систематическая погрешность определения вертикальной проекции кажущегося ускорения и систематическая и случайная погрешности вертикальной составляющей аномалии УСТ. В то же время, ошибки БИНС и систематические ошибки СНС в определении составляющих относительной скорости – величины наблюдаемые. Отметим, что при оценке ошибок БГНК наибольшую значимость приобретают факты того, что ошибка определения восточной проекции аномалии УСТ, ошибка определения восточной составляющей кажущегося ускорения и северная составляющая θ наблюдаются в комбинации, аналогично ошибка определения северной проекции аномалии УСТ, ошибка определения северной составляющей кажущегося ускорения и восточная составляющая θ наблюдаются в комбинации (при этом в условии пренебрежимо малой погрешности БА точность оценивания горизонтальных проекций аномалии УСТ в определяющей степени будет зависеть от точности определения горизонтальных проекций θ , соответственно справедлива и обратная зависимость); ошибка определения вертикальной аномалии наблюдается в комбинации с ошибкой определения вертикальной составляющей кажущегося ускорения (при этом очевидно, что для оценивания ошибки определения вертикальной аномалии с точностью не хуже 0,1 мГал необходимо обеспечить высокую точность БА на уровне 10^{-6} м/с²); восточная проекция систематических составляющих дрейфов БГ наблюдается в комбинации с ошибкой определения вертикальной составляющей ухода ВСК. Вместе с тем, нужно отметить, что в условиях движения объекта с постоянной путевой скоростью для того же вектора состояния ранг матрицы наблюдаемости увеличивается до 18. При этом важно заметить, что в комбинации продолжают наблюдаться соответствующие проекции ошибки определения аномалии и кажущегося ускорения, также, в частности, сохраняется наблюдаемость в комбинации соответствующих ошибок БИНС и систематических ошибок СНС в определении координат.

Итак, при моделировании рассмотрен типичный случай прямолинейного движения из

точки с координатами – широта $\varphi = 55,8114694^\circ$ с.ш., долгота $\lambda = 37,4998612^\circ$ в.д., высота $h = 164,15$ м, со скоростью $U_E = 1$ м/с, $U_N = 1$ м/с, $U_r = 0$ м/с и постоянной ориентацией – курс $\psi = 45^\circ$, тангаж $\nu = 0$, крен $\gamma = 0$ в течение 5400 с. Сигналы датчиков первичной информации заданы с шагом 0,5 с, соответственно, задачи определения параметров ориентации и навигации решаются с частотой 1 Гц. В каждой точке траектории вектор аномалии гравитационного поля задан постоянным, с проекциями на оси ГСК: $A_r = A_E = A_N = 10^{-4}$ м/с². Погрешности гироскопов, акселерометров и СНС заданы в виде нецентрированных белых шумов: математическое ожидание (МО) и СКО ошибок гироскопов – на уровне 0,01 град/ч, акселерометров – 10^{-6} м/с², СНС – 1 м для дифференциального режима (0,05 м для фазового режима) по определению координат и 0,05 м/с для обоих режимов по определению относительной скорости. Погрешность начальной выставки характеризуется ошибками определения начальных проекций радиус-вектора местоположения по 10 м, относительной скорости – по 0,01 м/с и неточным определением начальной матрицы ориентации, соответствующей ошибкам $\delta\psi = 10^{-3}$ рад, $\delta\nu = 10^{-4}$ рад, $\delta\gamma = 10^{-4}$ рад. Соответственно элементы начальной матрицы ковариации заданы следующим образом:

$$\sigma_\theta = 10^{-4} \text{ рад}, \sigma_{\delta U} = 0,01 \text{ м/с}, \sigma_{\delta R} = 10 \text{ м}, \sigma_{\Delta l} = 10^{-6} \text{ м/с}^2, \sigma_{\Delta\omega} = 0,01 \text{ град/ч}, \sigma_{\Delta R_c} = 1 (0,05) \text{ м}, \\ \sigma_{\Delta U_c} = 0,05 \text{ м/с}, A_{\max} = 10^{-4} \text{ м/с}^2,$$

а элементы матриц **Q** и **L**:

$$\sigma_{\Delta\omega_{x,y,z\text{б.ш.}}} = 0,01 \text{ град/ч}, \sigma_{\Delta l_{x,y,z\text{б.ш.}}} = 10^{-6} \text{ м/с}^2, \sigma_{\delta R_{\xi,\eta,\zeta\text{б.ш.}}} = 1 (0,05) \text{ м}, \sigma_{\delta U_{\xi,\eta,\zeta\text{б.ш.}}} = 0,05 \text{ м/с}.$$

Как показали результаты имитационного моделирования, в течение приблизительно 45 мин точностные характеристики БГНК как для разомкнутой, так и для замкнутой схем включения ОФК находятся на одном уровне. В ходе прямого моделирования для разомкнутой схемы далее начинается постепенная расходимость оценок. При этом вертикальная проекция аномалии УСТ оценивается с точностью 0,1 мГал для фазового режима работы СНС и 0,7 мГал для дифференциального режима (рис. 3). Также стоит отметить, что координаты определяются с точностью не хуже точности используемой СНС, уровень оцениваемости остальных параметров слабо зависит от режима работы СНС: горизонтальные проекции ухода ВСК оцениваются с точностью до 2 угл. с, горизонтальные проекции относительной скорости – до 0,0025 м/с, вертикальная – до 0,0002 м/с, горизонтальные проекции систематических составляющих дрейфов гироскопов – не хуже 0,002 град/ч, вертикальная – до 0,005 град/ч, что соответствует требованиям к проведению ВГИ. При этом стоит отметить поведение среднеквадратических ошибок оценивания элементов вектора состояния, полученных из матрицы **P**. Наблюдается очень быстрая

сходимость среднеквадратических ошибок оценивания горизонтальных проекций координат местоположения до уровня точности СНС, сходимость в течение 5 мин горизонтальных проекций относительной скорости к 0,002 м/с, вертикальной – к 0,0001 м/с, сходимость в течение приблизительно 2 мин горизонтальных проекций ухода ВСК к 2 угл. с, вертикальной – в течение 1 ч к 1 угл. мин, сходимость в течение 5 мин вертикальной проекции аномалии УСТ к $1 \cdot 10^{-6}$ м/с² (для фазового режима работы СНС) и к $7 \cdot 10^{-6}$ м/с² (для дифференциального режима), сходимость в течение приблизительно 10 мин систематических составляющих дрейфов БГ по горизонтальным осям к 0,0015 град/ч и в течение 1 ч к 0,003 град/ч по вертикальной оси. Дальнейшее исследование показало, что в случае стационарного представления аномального поля УСТ в виде постоянных вертикальной аномалии и уклонений отвесной линии как для случаев стоянки, так и движения МПА (БЛА) в широком скоростном диапазоне в пределах области постоянной аномалии погрешность определения A_r в определяющей степени зависит от систематической погрешности определения вертикального кажущегося ускорения БА, а также пропорциональна погрешности определения высоты (погрешность определения высоты 0,3 м вызывает ошибку оценивания вертикальной составляющей аномалии на уровне 0,1 мГал) [6].

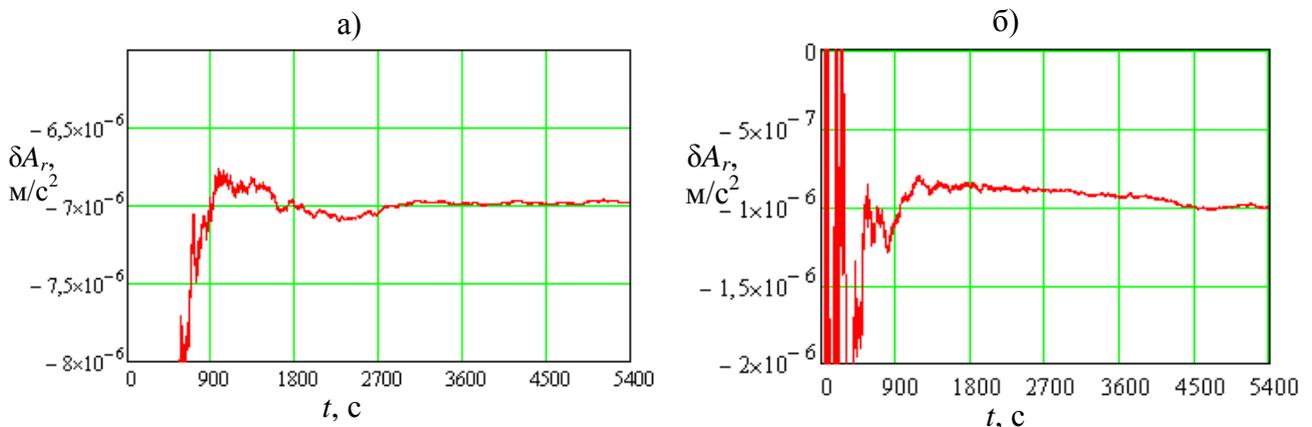


Рисунок 3 – Ошибка оценивания вертикальной проекции аномалии УСТ в случае а) дифференциального режима работы СНС, б) фазового режима

В то же время исследование актуальной задачи определения уклонений отвесной линии показало, что поскольку параметры ориентации и уклонений отвесной линии для исследуемого состава комплекса наблюдаются совместно, то решение задачи с точностью единиц угл. с требует столь же точного определения начального ухода ВСК, другими словами, весьма высокоточной начальной выставки БИНС по параметрам ориентации,

например, с использованием информации внешних прецизионных систем ориентации и навигации, корректируемых радио- и астросредствами.

Кроме того, проведенное исследование подтвердило эффективность работы БГНК даже в случае шумов акселерометров, представляющих собой нецентрированные белые шумы с СКО до 10^{-4} м/с² или стационарные случайные процессы первого порядка с СКО σ_n до $5 \cdot 10^{-5}$ м/с² и коэффициентом затухания μ_n порядка 0,01-1 с⁻¹, при сохранении их МО на уровне 10^{-6} м/с². Например, для случая включения ОФК в БГНК по замкнутой схеме при фазовых измерениях СНС и при том же уровне погрешностей гироскопов и начальной выставки, что и ранее, погрешности определения постоянной вертикальной аномалии в зависимости от вида шумов акселерометров составили до $1-2 \cdot 10^{-6}$ м/с². Также было установлено, что рассматриваемый алгоритм коррекции демонстрирует требуемые высокие точностные характеристики при определении вертикальной проекции аномалии УСТ (на уровне десятых долей мГал) при более грубых гироскопических датчиках ($\Delta\omega_{\text{сист}} = 0,1$ град/ч, $\sigma_\omega = 0,1$ град/ч, $\mu_\omega = 0,1-1$ с⁻¹, погрешность масштабного коэффициента $\Delta k_\omega = 0,005\%$) и СНС ($\sigma_R = 1$ м, $\mu_R = 0,1-1$ с⁻¹, $\sigma_U = 0,05$ м/с, $\mu_U = 0,1-1$ с⁻¹).

Аномалия УСТ, как правило, имеет длиннопериодные гармонические, случайные, линейно-нарастающие и постоянные составляющие [8,9]. Для наиболее общего случая переменной аномалии в системе дифференциальных уравнений она может быть представлена: а) совокупностью постоянных составляющих (начальные значения проекций аномалии), линейно-нарастающих составляющих и стационарных случайных процессов первого порядка с корреляционной функцией общего вида

$$K(\tau) = \sigma^2 e^{-\mu|\tau|},$$

б) полиномами 2-й, 3-й и т.д. степени. Предварительные исследования показали, что наиболее предпочтительным является первый способ представления.

Теоретические исследования, а также результаты имитационного моделирования показали, что при оценке переменной аномалии происходит фазовый сдвиг выходного сигнала ОФК относительно истинного оцениваемого значения аномалии УСТ. Установлено, что одновременно имеет место и некоторое дополнительное подавление сигнала по амплитуде помимо влияния сглаживающего фильтра. Для анализа принципиальной возможности и эффективности использования АЧХ и ФЧХ алгоритма оценивания аномалии при обработке сигнала оценки, эти характеристики были получены экспериментально посредством исследования имитационной модели.

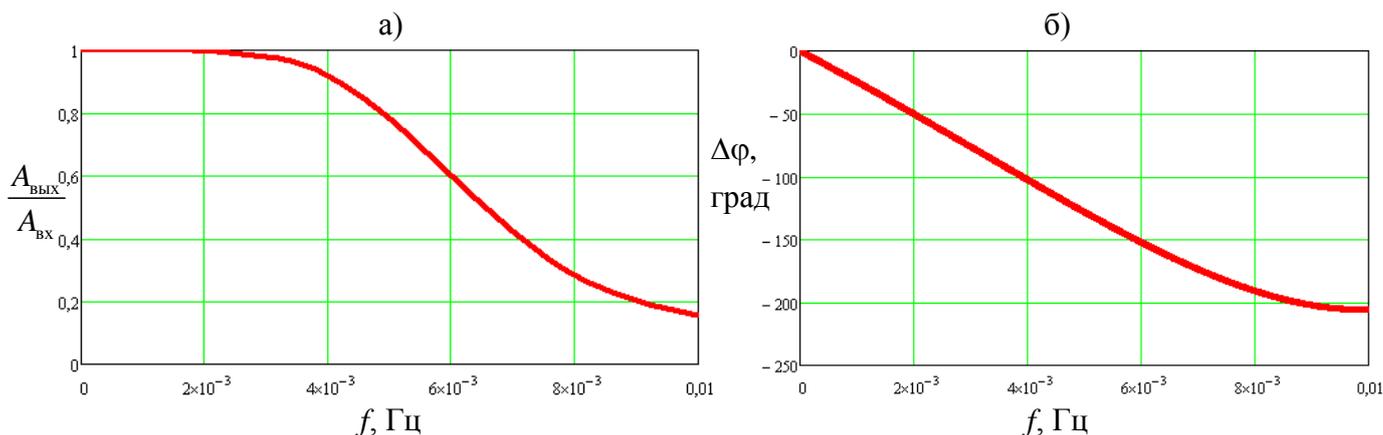


Рисунок 4 – а) АЧХ и б) ФЧХ алгоритма оценивания аномалии УСТ. Здесь $A_{\text{ВЫХ}}$ – амплитуда выходного сигнала, $A_{\text{ВХ}}$ – амплитуда входного сигнала, $\Delta\phi$ – разность фаз выходного и входного сигналов

Как показано на рис. 5, воспользовавшись характеристиками, приведенными на рис. 4, можно значительно снизить (до десятых долей мГал) ошибки оценивания типичной переменной аномалии [9] посредством введения одним из известных способов соответствующего преобладающей частоте аномалии временного сдвига и масштабирования ее оценки [10]. Отметим также, что на рис. 5 приведены результаты, полученные при моделировании БГНК при работе СНС в фазовом режиме, при этом при дифференциальном режиме ошибки оценивания аномалии имеют похожий характер и отличаются в основном средним установившимся значением (аналогично графикам на рис. 3). Точность БГНК в определении остальных параметров в целом соответствует точности его работы в условиях постоянной аномалии УСТ.

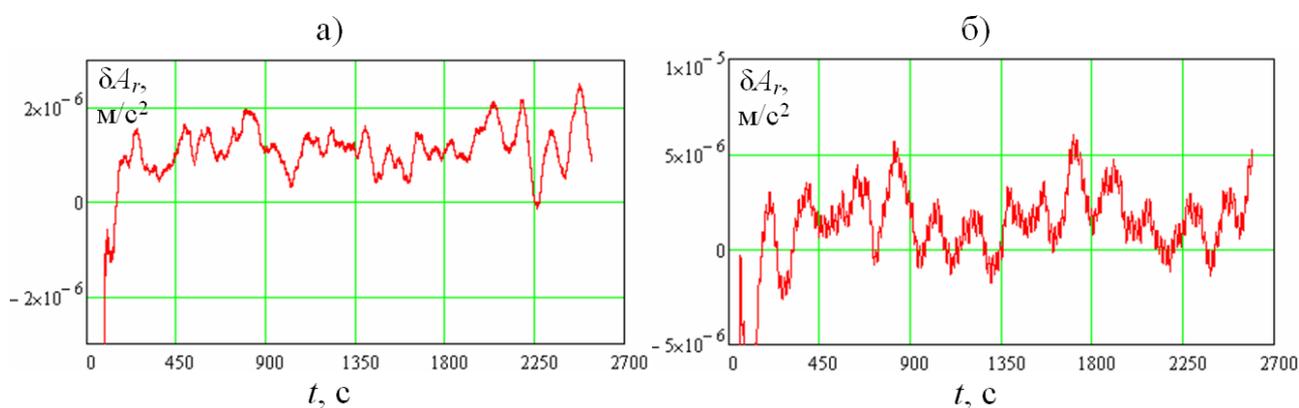


Рисунок 5 – Ошибки оценивания вертикальной аномалии после амплитудно-фазовой коррекции при движении подвижного объекта со скоростью а) 1 м/с, б) 10 м/с

Кроме того, с использованием разработанных имитационных моделей были получены идеализированные ожидаемые результаты для практических исследований, проводимых в лабораторных условиях на неподвижном нестабилизированном основании. Анализ работы БГНК проводился для неподвижного относительно Земли случая в условиях имитации ступенчатого изменения аномалии УСТ (с 10 до 9,5 мГал для ее вертикальной проекции и с 0 до 50 мГал для горизонтальных проекций).

На рис. 6 представлены ступенчатое изменение вертикальной проекции аномалии УСТ и ее сглаженная фильтр с осреднением на 400 с оценка с погрешностью порядка 0,1 и до 0,3 мГал соответственно для случая коррекции посредством СНС, работающей в фазовом и дифференциальном режимах.

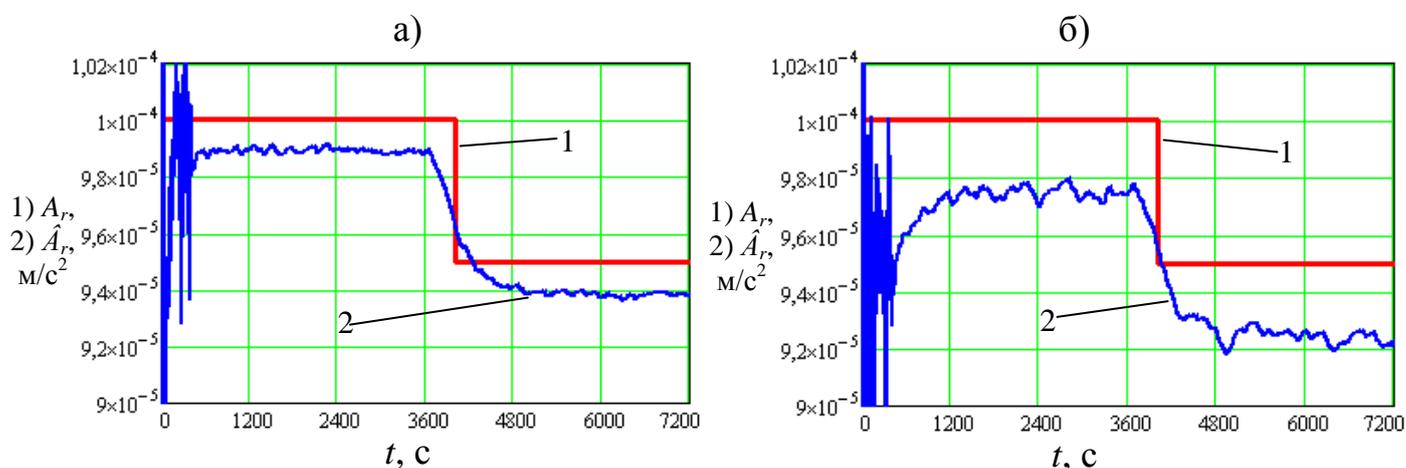


Рисунок 6 – Ступенчато изменяющаяся вертикальная проекция аномалии УСТ (1) и ее оценка (2) при коррекции посредством СНС, работающей в а) фазовом и б) дифференциальном режимах

Для оценок горизонтальных проекций аномалии УСТ были получены аналогичные результаты, но с погрешностью порядка 10 мГал в обоих вариантах. При этом оцениваемость остальных параметров находится на том же уровне, что и в рассмотренном ранее случае постоянной аномалии УСТ.

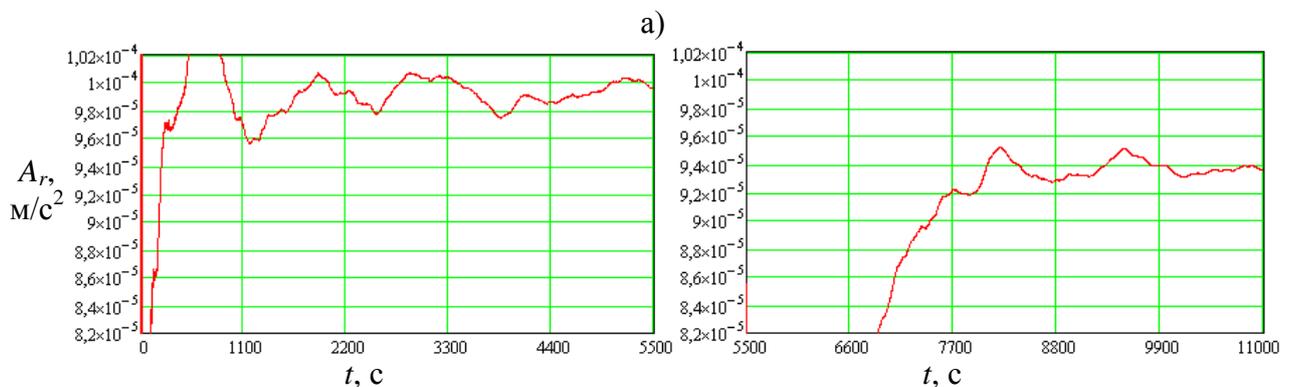
Полунатурное моделирование

Полунатурное моделирование проводилось с использованием реальных показаний приборов макета БГНК (гироскопов ТИУС-500, акселерометров АК-6, приемников СНС LEA-4S и NetR5), установленных на неподвижном нестабилизированном основании. При этом для простоты сопоставления результатов с выполненным в последствии экспериментальным

исследованием аномалия была симитирована ступенчато изменяющейся величиной путем добавления с определенного момента времени к снятым показаниям акселерометров постоянных сигналов соответствующих уровней. В качестве начальных значений для корректируемого алгоритма БГНК были заданы указанные выше координаты, $U = 0$, $v = \gamma = 0$, $\psi = 337,247^\circ$ (по показаниям БГ). Сигналы БА, БГ и СНС считаны из соответствующих файлов. Для первого промежутка времени (0–5500 с) вертикальная аномалия задана величиной 10 мГал, для второго (5500–11000 с) – 9,5 мГал. Аналогично для тех же временных интервалов с целью демонстрации возможности определения БГНК уклонений отвесной линии симитировано их ступенчатое изменение (с 0 до 10 угл. с для северной и восточной составляющих, или, что то же самое, с 0 до 50 мГал для горизонтальных проекций аномалии УСТ). Выше было отмечено, что оценивание ошибок определения горизонтальных проекций аномалии УСТ происходит совместно с горизонтальными проекциями ухода ВСК, поэтому при полунатурном моделировании начальные ошибки определения крена и тангажа заданы на уровне 10^{-5} рад. Соответственно элементы начальной матрицы ковариации заданы следующим образом:

$\sigma_\theta = 3 \cdot 10^{-5}$ рад, $\sigma_{\delta U} = 0,01$ м/с, $\sigma_{\delta R} = 10$ м, $\sigma_{\Delta n} = 10^{-6}$ м/с², $\sigma_{\Delta \omega} = 0,1$ град/ч, $\sigma_{\Delta R_{\text{СНС}}} = 0,5$ м, $\sigma_{\Delta U_{\text{СНС}}} = 0,1$ м/с (для дифференциального режима работы СНС), $\sigma_{\Delta R_{\text{СНС}}} = 0,05$ м, $\sigma_{\Delta U_{\text{СНС}}} = 0,1$ м/с (для фазового режима работы СНС), $A_{\text{max}} = 5 \cdot 10^{-4}$ м/с², а элементы матриц **Q** и **L**:
 $\sigma_{\Delta \omega_{x,y,z} \text{ б.ш.}} = 0,1$ град/ч, $\sigma_{\Delta n_{x,y,z} \text{ б.ш.}} = 10^{-4}$ м/с², $\sigma_{\delta R_{\xi,\eta,\zeta} \text{ СНС б.ш.}} = 0,5$ м, $\sigma_{\delta U_{\xi,\eta,\zeta} \text{ СНС б.ш.}} = 0,1$ м/с (для дифференциального режима работы СНС), $\sigma_{\delta R_{\xi,\eta,\zeta} \text{ СНС б.ш.}} = 0,05$ м, $\sigma_{\delta U_{\xi,\eta,\zeta} \text{ СНС б.ш.}} = 0,1$ м/с (для фазового режима работы СНС).

В алгоритме оценивания и коррекции аномалия УСТ была представлена как постоянная величина, поэтому для обоих промежутков времени алгоритм оценивания и коррекции запускался с одними и теми же начальными условиями. На рис. 7 представлены результаты определения ступенчато изменяющихся проекций аномалии УСТ.



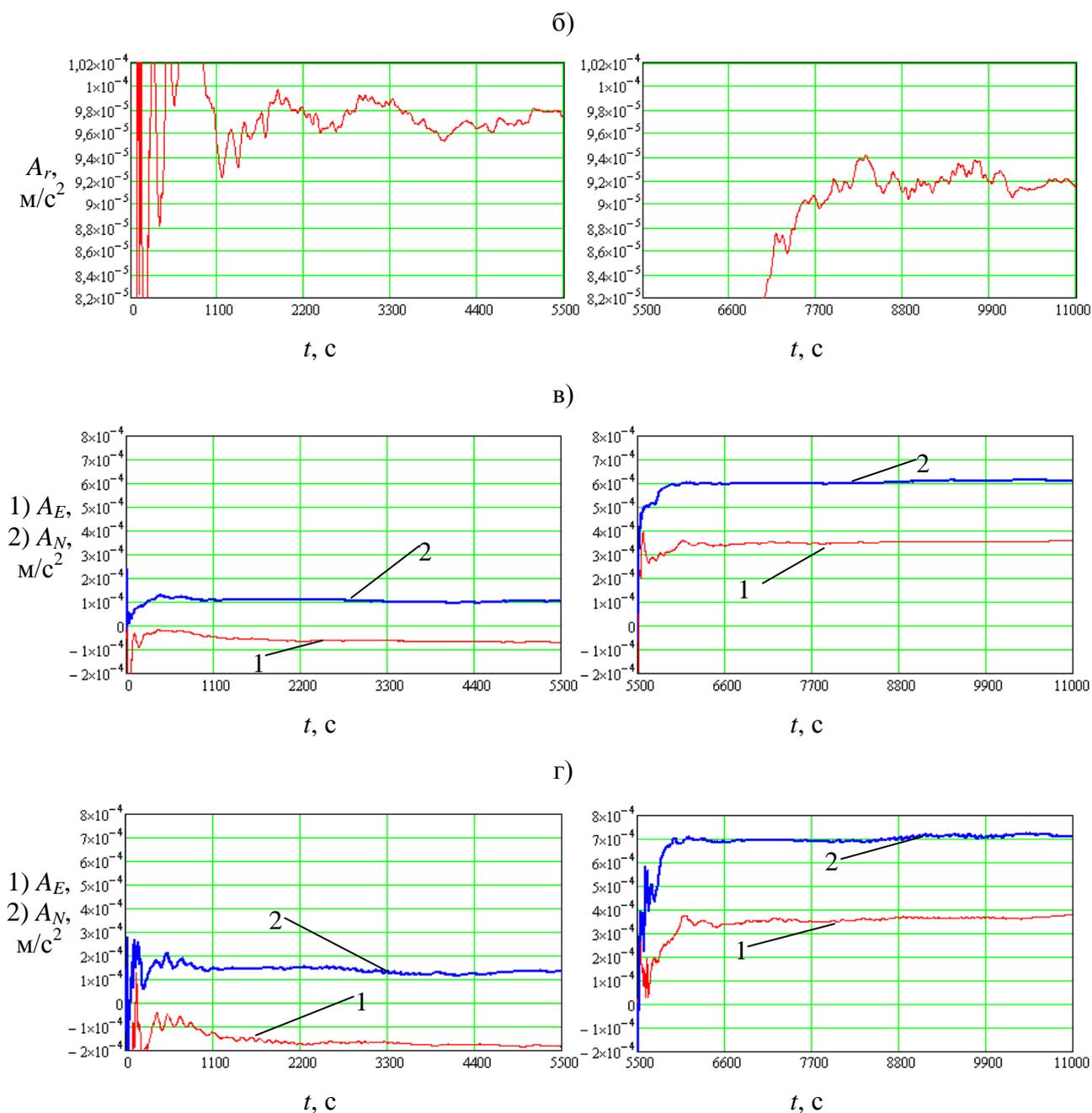


Рисунок 7 – Вычисленные в БГНК при использовании приемников СНС, работающих в фазовом и дифференциальном режимах вертикальная проекция аномалии УСТ а) и б) – соответственно и ее горизонтальные проекции в) и г) – соответственно

Результаты полунатурных исследований продемонстрировали ожидаемое поведение оценок БГНК определения проекций аномалии УСТ [5,6]. При этом заметно своевременное приращение оценки вертикальной аномалии УСТ на величину близкую к 0,5 мГал с погрешностью ее оценивания порядка 0,1-0,2 мГал, однако по сравнению с имитационным моделированием (рис. 3, б) время оценивания увеличилось ориентировочно до 2000 с.

Аналогично отмечено своевременное приращение оценок горизонтальных проекций аномалии УСТ на заданную величину (50 мГал) с погрешностью до 8-15 мГал для фазового режима и до 15-20 мГал для дифференциального режима работы СНС вместе с небольшим увеличением времени оценивания. Кроме того, оценки остальных параметров также демонстрируют ожидаемое поведение, аналогичное случаю имитационного моделирования, при этом наблюдается их устойчивая сходимость и высокая стабильность. Координаты местоположения вычисляются с точностью, не хуже точности используемого приемника СНС. Погрешности определения горизонтальных проекций относительной скорости не превысили 0,003 м/с, вертикальной – 0,001 м/с, что соответствует результатам, полученным в ходе имитационного моделирования, и удовлетворяет требованиям к проведению ВГИ. Также стоит отметить относительно плохую сходимость оценки угла курса, что для неподвижного относительно Земли случая практически не сказывается на точности определения параметров УСТ. При этом средние значения показаний БГНК по определению крена и тангажа соответствуют заданным нулевым значениям с точностями 2 – 3 угл. с, что незначительно превышает аналогичные погрешности, полученные в ходе имитационного моделирования, в частности, в силу более высокого уровня погрешностей используемых в практических исследованиях БА и БГ по сравнению с соответствующими погрешностями, заданными в имитационных моделях, но вместе с тем удовлетворяет требованиям к проведению ВГИ. Ошибки оценивания систематических погрешностей БГ составили величины до 0,01 град/ч для его показаний по горизонтальным осям и до 0,15 град/ч – по вертикальной оси (для обоих режимов работы СНС), что соответствует результатам, полученным в ходе исследования имитационных моделей БГНК.

Заключение

Итак, в работе приведены состав, основные алгоритмы работы и характеристики перспективного аэроморского малогабаритного бесплатформенного гравиинерциального навигационного комплекса. Представлены результаты имитационного моделирования его работы на неподвижном и подвижном основании, а также полунатурного моделирования его работы в условиях неподвижного нестабилизированного основания с имитацией ступенчатого изменения гравитационной аномалии. Была установлена высокая степень сходимости результатов имитационного и полунатурного моделирования. Показано, что ожидаемые точностные характеристики комплекса по параметрам ориентации и навигации соответствуют современным достижениям в области построения навигационных комплексов подвижных объектов. В тоже время подтверждено, что ожидаемые метрологические

характеристики комплекса по гравиметрическим параметрам соответствуют потребностям современной аэроморской гравиметрии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по проектам 2.1.2/12142 АВЦП “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)”, П787 от 24.05.2010г. и 14.740.11.1434 от 03.11.2011г. ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы”.

Библиографический список

1. Применение гравиинерциальных технологий в геофизике. Сборник статей и докладов. Под общей редакцией академика РАН В.Г. Пешехонова. -СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2002.

2. Тювин А.В., Афонин А.А., Черноморский А.И. Об одной концепции векторных гравиметрических измерений // Авиакосмическое приборостроение, 2005, №3, с. 24-29.

3. Тювин А.В., Афонин А.А., Жарков М.В., Карачевцев М.В., Сулаков А.С. Оценка возможностей бесплатформенного гравиинерциального навигационного комплекса в задачах векторной морской гравиметрии с использованием спутниковой навигации // Авиакосмическое приборостроение. –М.: 2007, № 6, с. 36-40.

4. Черноморский А.И., Афонин А.А. Исследование возможности использования глубиномерной системы для коррекции параметров ориентации в бесплатформенном гравиинерциальном навигационном комплексе // Авиакосмическое приборостроение. –М.: 2006, № 1, с. 20-26.

5. Афонин А.А., Сулаков А.С. Алгоритм оценивания параметров гравитационного поля, ориентации и навигации бесплатформенного гравиинерциального комплекса // Мехатроника, автоматизация, управление. –М.: 2011, № 9, с. 58-65.

6. Афонин А.А., Сулаков А.С. О коррекции параметров ориентации, навигации и гравиметрии в замкнутой схеме включения фильтра Калмана навигационного комплекса // Авиакосмическое приборостроение. –М.: 2011, № 8, с. 17-24.

7. Ривкин С.С., Ивановский Р.И., Костров А.В. Статистическая оптимизация навигационных систем. Л.: Судостроение, 1976.

8. Грушинский Н.П. Основы гравиметрии. –М.: Главная редакция физико-математической лит., 1983.

9. Ривкин С.С., Береза А.Д. Гироскопическая стабилизация морских гравиметров. –М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985.

10. Блажнов Б.А., Несенюк Л.П., Элинсон Л.С. Исключение эффекта сглаживания

гравитационного поля при обработке показаний затушенного аэроморского гравиметра. Гироскопия и навигация, 1995, N3(10).

Сведения об авторах

Афонин Александр Анатольевич, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.;
Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, МАИ, тел.: +7-499-158-43-42; e-mail: Al_aa@mail.ru;

Репников Александр Васильевич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.,
Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, МАИ, тел.: +7-499-158-43-59; e-mail: kaf305-mai@nm.ru;

Сулаков Андрей Сергеевич, старший преподаватель Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.;
Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, МАИ, каф. 305; тел.: +7-499-158-48-51; e-mail: kaf305-mai@mail.ru;

Ямашев Григорий Григорьевич, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета);
Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, МАИ, тел.: +7-499-158-48-51; e-mail: kaf305-mai@mail.ru.