

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕКТОРНОГО МАГНИТОМЕТРА И ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ БИНС ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА*

В. С. Вязьмин¹, А. А. Голован²,

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Университет ИТМО, С.-Петербург,
e-mail: aagolovan@yandex.ru

И. А. Папуша³, М. Ю. Попеленский⁴

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Аннотация

Ключевые слова: коррекция БИНС, магнитометр, глобальная модель геомагнитного поля

Исследуется информативность цифровых глобальных моделей геомагнитного поля высокого пространственного разрешения в задаче навигации летательного аппарата, навигационный комплекс которого включает бескарданную инерциальную навигационную систему и феррозондовый трехосный магнитометр. Ставится задача коррекции БИНС по измерениям магнитометра при использовании глобальной модели геомагнитного поля. Представлены результаты обработки модельных данных при использовании глобальной модели EMM2015.

Введение

Важным требованием, предъявляемым к современным навигационным системам летательных аппаратов, является возможность работы в автономном режиме с необходимой точностью. Известным методом автономной навигации летательных аппаратов в околоземном пространстве является метод навигации с использованием геофизических полей, который также нередко называется методом корреляционно-экстремальной навигации [1-3]. В частности, одним из таких полей может служить магнитное поле Земли [4-10].

В настоящее время доступны данные о геомагнитном поле высокого пространственного разрешения, предоставляемые цифровыми глобальными моделями (EMM2015, HDGM2015 и др.). Данные глобальных моделей представлены в виде коэффициентов разложения геомагнитного потенциала по сферическим гармоникам и получены в результате обработки спутниковых, морских, авиационных и наземных магнитометрических измерений. Глобальные модели EMM2015, HDGM2015 содержат информацию как о нормальном (основном), так и об аномальном геомагнитном поле, позволяя выявлять региональные аномалии с длинами волн до 50-60 км. Коэффициенты моделей регулярно обновляются (каждые пять лет для EMM2015 и ежегодно для HDGM2015). Целью настоящей работы является исследование информативности применения в задаче навигации летательного аппарата данных глобальной модели высокого пространственного разрешения. Предполагается, что навигационный комплекс летательного аппарата включает бескарданную инерциальную навигационную систему (БИНС) и феррозондовый трехосный магнитометр. В задаче навигации вместо корреляционно-экстремального подхода (или наряду с ним) предполагается использовать подход на основе коррекции БИНС по разности магнитометрических измерений и данных глобальной модели. При указанном подходе для получения уравнений корректирующих измерений требуется линеаризация разности измерений магнитометра и значения поля в модельной точке. Возникающая при этом матрица градиентов вектора напряженности поля может быть вычислена по аналитическим формулам по данным глобальной модели. Решение задачи коррекции БИНС сводится к стандартному методу калмановской фильтрации. В работе приведены результаты обработки модельных данных, полученных для смоделированной траектории движения самолета с использованием данных глобальной модели EMM2015.

Следует отметить, что данные глобальных моделей геомагнитного поля высокого пространственного разрешения содержат разнородные ошибки, что может вносить ряд ограничений при применении данных в задаче геомагнитной навигации летательного аппарата. К ним относятся ошибка аппроксимации временных изменений (векового хода) основного геомагнитного поля (см., например, [11]), ошибка, вызванная погрешностями исходной измерительной информации (СКП порядка 100 нТл для рассматриваемых моделей), а также ошибка, вызванная влиянием коротковолновых аномалий, не учтенных моделью. В работе из вышеперечисленных погрешностей учитывается только влияние последних. Кроме погрешностей глобальных данных на точность геомагнитной навигации оказывают влияние вариационная изменчивость геомагнитного поля (солнечно-суточные вариации, магнитные бури) и магнитные поля носителя [12]. Указанные погрешности в работе не рассматриваются.

¹Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник.

²Доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией.

³Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

⁴Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Модели и алгоритм оценивания

Математическое построение глобальных моделей магнитного поля Земли основано на разложении скалярного геомагнитного потенциала U , удовлетворяющего уравнению Лапласа во внешнем пространстве Земли, в ряд по сферическим (шаровым) функциям [1]

$$U(\lambda, \varphi_0, r, t) = a \sum_{n=1}^N \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi_0), \quad (1)$$

где g_n^m, h_n^m – коэффициенты гармонического разложения потенциала, предоставляемые глобальной моделью, N – максимальная степень разложения, $P_n^m(\sin \varphi_0)$ – нормированные по Шмидту присоединенные полиномы Лежандра, a – радиус сферической модели Земли ($a=6371.2$ км), λ, φ_0, r – сферические координаты произвольной точки на поверхности или во внешнем пространстве Земли, t – время, от которого зависят только коэффициенты разложения нормального поля (первые 12-16 степеней) в силу векового хода поля. В глобальных моделях эти коэффициенты сопровождаются поправками для учета векового хода в линейном приближении. С помощью аналитических выражений по глобальным данным могут быть рассчитаны характеристики магнитного поля Земли. Вектор напряженности в точке M определяется как $B_x = -\nabla_x U$, где ∇_x – оператор градиента в географической системе координат Mx .

Рассмотрим задачу навигации летательного аппарата, на борту которого установлены БИНС и феррозондовый трехосный магнитометр. Введем модели измерений инерциальных датчиков в виде:

$$f_z' = f_z + \Delta f_z^0 + \delta f_z^s, \quad \omega_y = \omega_z - v_z^0 - v_z^s,$$

где f_z', ω_y – показания ньютометров и датчиков угловой скорости, f_z, ω_z – истинные значения удельной внешней силы в осях приборного трехгранника Mz и абсолютной угловой скорости вращения трехгранника Mz , Δf_z^0 – постоянные смещения нулевого сигнала ньютометров, v_z^0 – постоянные составляющие гироскопических дрейфов датчиков угловой скорости, $\delta f_z^s, v_z^s$ – случайные погрешности ньютометров и датчиков угловой скорости (белый шум с нулевым средним). Приборный трехгранник Mz предполагается совпадающим со связанной с корпусом летательного аппарата системой координат: ось Mz_1 направлена вдоль правого крыла, Mz_2 – по продольной оси к носу летательного аппарата, Mz_3 расположена в плоскости симметрии и направлена вверх по отношению к летательному аппарату.

Возмущенный режим работы БИНС описывается с помощью уравнений ошибок, полученных в результате линеаризации уравнений движения в окрестности модельного движения. Введем географическую систему координат Mx ($Mx \in X_{NUP}$), ошибки определения местоположения $\Delta r_E, \Delta r_N$, динамические ошибки относительной скорости $\delta V_E, \delta V_N$, угловые ошибки ориентации приборного трехгранника $\alpha_E, \alpha_N, \beta_3$. Ошибки вертикального канала БИНС в работе не рассматриваются. Уравнения ошибок горизонтальных каналов БИНС имеют вид [13]:

$$\begin{aligned} \Delta r_E &= \Omega_{Up} \Delta r_N + \delta V_E + \beta_3 V_N, \\ \Delta r_N &= -\Omega_{Up} \Delta r_E + \delta V_N - \beta_3 V_E, \\ \delta \dot{V}_E &= (\Omega_{Up} + 2u_{Up}) \delta V_N - \alpha_N g + \Delta f_{x_E}, \\ \delta \dot{V}_N &= -(\Omega_{Up} + 2u_{Up}) \delta V_E + \alpha_E g + \Delta f_{x_N}, \\ \alpha_E &= -\frac{\delta V_N}{a} + (\Omega_{Up} + u_{Up}) \alpha_N - u_{Up} \frac{\Delta r_E}{a} - u_N \beta_3 + v_{x_E}, \\ \alpha_N &= \frac{\delta V_E}{a} - (\Omega_{Up} + u_{Up}) \alpha_E - u_{Up} \frac{\Delta r_N}{a} + u_E \beta_3 + v_{x_N}, \\ \beta_3 &= (\Omega_N + u_N) \left(\alpha_E + \frac{\Delta r_N}{a} \right) - (\Omega_E + u_E) \left(\alpha_N - \frac{\Delta r_E}{a} \right) u_E + v_{x_{Up}}, \end{aligned}$$

где $\Omega_E, \Omega_N, \Omega_{Up}$ – компоненты вектора относительной угловой скорости вращения географического трехгранника, u_E, u_N, u_{Up} – компоненты вектора угловой скорости вращения Земли, g – значение модуля вертикальной проекции вектора силы тяжести.

Сформируем уравнения корректирующих магнитометрических измерений. Введем модель измерений феррозондового трехосного магнитометра, считая, что его оси чувствительности направлены вдоль осей приборного трехгранника Mz , в виде $B_z' = B_z + \Delta B_z$, где B_z – истинное значение вектора напряженности геомагнитного поля, ΔB_z – инструментальная погрешность (белый шум с нулевым средним).

Далее, пусть $B_x^g = B_x^g(\lambda', \varphi', h')$ – значение вектора напряженности геомагнитного поля в модельном трехграннике в точке (λ', φ', h') , вычисляемое по данным глобальной модели. Обозначим через $B'_{y,x}$ проекцию вектора измерений B'_z на оси квазимодельного трехгранника [13] и сформируем вектор корректирующих измерений в виде разности $z = B'_{y,x} - B_x^g$. Линеаризуя разность в окрестности модельной точки, получим уравнения корректирующих измерений в форме:

$$\begin{aligned} z_1 &= \left(-\frac{\partial B_E^g}{\partial \lambda} + B'_2 \sin \varphi \right) \frac{\Delta r_E}{a \cos \varphi} - \frac{1}{a} \frac{\partial B_E^g}{\partial \varphi} \Delta r_N - B'_3 \alpha_N + B'_2 \beta_3 + \Delta B_1, \\ z_2 &= \left(-\frac{\partial B_N^g}{\partial \lambda} - B'_1 \sin \varphi \right) \frac{\Delta r_E}{a \cos \varphi} - \frac{1}{a} \frac{\partial B_N^g}{\partial \varphi} \Delta r_N + B'_3 \alpha_E - B'_1 \beta_3 + \Delta B_2, \\ z_3 &= -\frac{\partial B_{Up}^g}{\partial \lambda} \frac{\Delta r_E}{a \cos \varphi} - \frac{1}{a} \frac{\partial B_{Up}^g}{\partial \varphi} \Delta r_N + B'_1 \alpha_N - B'_2 \alpha_E + \Delta B_3, \end{aligned} \quad (2)$$

где B'_1, B'_2, B'_3 – компоненты вектора B_x^g ; $\Delta B_1, \Delta B_2, \Delta B_3$ – компоненты проекции вектора ΔB_z на оси квазимодельного трехгранника. Значения частных производных компонент вектора напряженности в модельной точке в (2) могут быть вычислены по данным глобальной модели дифференцированием ряда (1). Задача коррекции параметров ошибок горизонтальных каналов БИНС по измерениям (2) может быть поставлена в виде задачи линейной калмановской фильтрации. Отметим, что погрешности глобальной модели не учитываются в (2).

Результаты расчетов

С помощью разработанного алгоритма коррекции БИНС проведена обработка модельных данных. Данные получены для смоделированной траектории движения самолета с помощью алгоритмов, предложенных в [14]. Рассмотрено движение в восточном направлении на высоте $h=4000$ м из начальной точки с географическими координатами $\lambda=37^\circ$ в. д., $\varphi=55^\circ$ с. ш. Средняя скорость самолета – 100 м/с. Время движения – 8 ч. Изменение углов ориентации корпуса самолета колебательное с периодом 60 с и амплитудой 1° .

Случайные погрешности измерений инерциальных датчиков $\delta f_z^s, v_z^s$ моделировались как белый шум с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением (СКО) 20 угл.с. на частоте 1 Гц для δf_z^s и $0.01^\circ/\text{ч}$ на 1 Гц для v_z^s . Постоянные смещения нулевого сигнала акселерометров равны 5 угл.с. Постоянные составляющие дрейфов гироскопов приняты равными $0.01^\circ/\text{ч}$. Частота измерений 10 Гц.

Для имитации показаний векторного феррозондового магнитометра использовалась модель в виде

$$B'_z = L_{xz} (B_x^g + B_x^{loc}) + \Delta B_z, \quad (3)$$

где L_{xz} – матрица перехода от географического к приборному трехграннику; B_x^g – сумма основного и аномального (вплоть до степени $N=720$ в гармоническом разложении) полей, рассчитываемая по данным глобальной модели ЕММ2015 (эквивалентная длина волны аномалии 56 км); B_x^{loc} – поле коротковолновых аномалий, не учтенных в B_x^g . Поле B_x^{loc} рассчитано вдоль траектории по эвристической модели $B_1^{loc} = A \sin 2N\lambda \cos 2N\varphi$, $B_2^{loc} = A \cos 2N\lambda \sin 2N\varphi$, $B_3^{loc} = A \cos 2N\lambda \cos 2N\varphi$ с амплитудой $A=700$ нТл и частотой гармоник $2N=1440$ (эквивалентная длина волны 15 км). При этом модель содержит три участка с локальной аномалией высокой интенсивности (амплитуда 1500 нТл, частота гармоник $8N$, эквивалентная длина волны 7 км). Длина каждого участка 30 км, время начала движения над каждым из участков: 6800 с, 10600 с, 23300 с. Погрешность измерений магнитометра ΔB_z моделировалась как белый шум с нулевым средним и СКО 20 нТл на 1 Гц. Модельные показания магнитометра приведены на рис. 1.

Коррекция БИНС проводилась с частотой 0.02 Гц. Результаты оценивания ошибок определения местоположения приведены рис. 2 и рис. 3. Скачки оценок обусловлены коррекцией на участках с интенсивными локальными аномалиями. Ошибки оценивания не превосходят 4 км при движении в течение первых 4 ч, после чего ошибки оценивания убывают до 1 км.

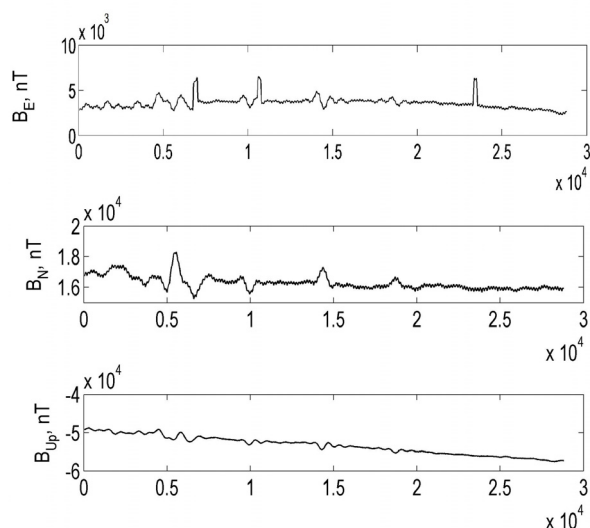


Рис. 1. Смоделированные магнитометрические измерения вектора напряженности в зависимости от времени, [с]: восточная компонента (вверху), северная компонента (в центре), вертикальная компонента (внизу), [нТл]

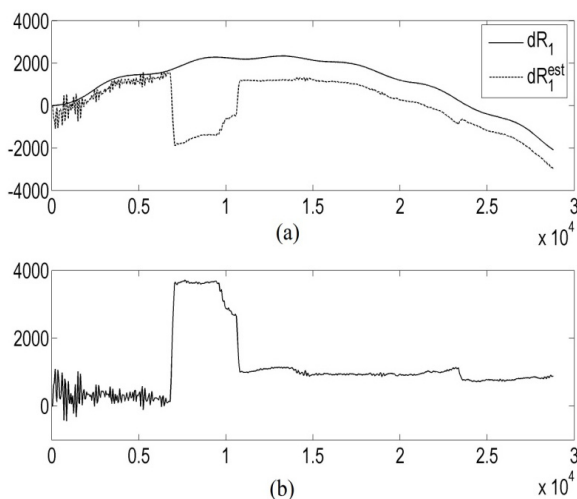


Рис. 2. (а) Восточная составляющая ошибки определения местоположения (сплошная линия) и ее оценка (пунктирная линия), [м], в зависимости от времени, [с]. (б) Ошибка оценки, [м]

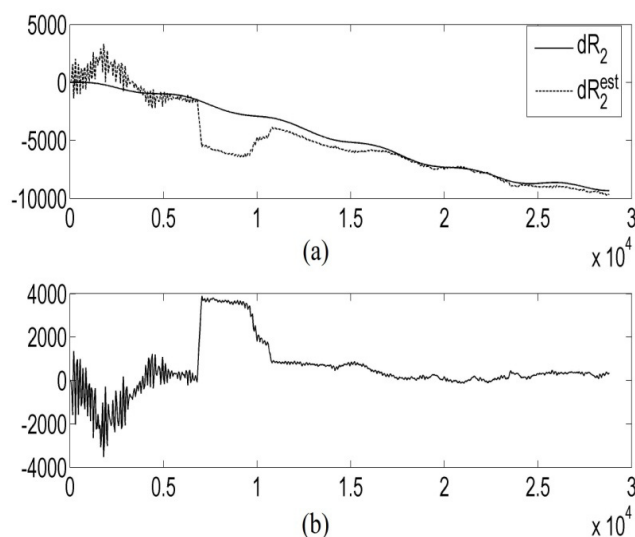


Рис. 3. (а) Северная составляющая ошибки определения местоположения (сплошная линия) и ее оценка (пунктирная линия), [м], в зависимости от времени, [с]; (б) Ошибка оценки, [м]

Заключение

В работе рассмотрена задача коррекции БИНС самолета по измерениям феррозондового магнитометра и данным глобальной модели высокого пространственного разрешения EMM2015 с применением подхода на основе линейной калмановской фильтрации. Показано, что достижима точность определения координат местоположения порядка 1 км при использовании БИНС высокого класса точности. При этом точность геомагнитной навигации оказывается слабо зависящей от интенсивных локальных магнитных аномалий, не учтенных глобальной моделью, при продолжительном полете. Рассмотрение более полной модели погрешностей измерений магнитометра и данных глобальной модели требует дальнейшего исследования. Интересным также представляется вопрос комплексного использования измерений о различных геофизических полях, в частности - магнитном и гравитационном [1, 15].

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект No14-29-00160).

Литература

1. **Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П.** Основы навигации по геофизическим полям. – М.: Наука, 1985. – 328 с.
2. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Часть 1. Обзор алгоритмов //Гирскопия и навигация. – 2015. - №3. – С. 102-125.
3. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Часть 2. Современные тенденции развития //Гирскопия и навигация. – 2015. - №4. – С. 147-159.
4. **Михлин Б.З., Селезнёв В.П., Селезнёв А.В.** Геомагнитная навигация. – М.: Машиностроение, 1976. – 279 с.
5. **Павлов Ю.Н., Селезнёв А.В., Толстоусов Г.Н.** Геоинформационные системы. – М.: Машиностроение, 1978. – 272 с.
6. **Goldenberg F.** Geomagnetic Navigation beyond the Magnetic Compass// Proceedings of IEEE/ION PLANS 2006. - 2006. P. 684-694.
7. **Каршаков Е.В.** Применение измерений параметров градиента магнитного поля Земли в задаче навигации летательного аппарата. –Управление большими системами. 2011. Т. 35. С. 265-282.
8. **Shockley J.A.** Ground Vehicle Navigation Using Magnetic Field Variation : PhD thesis Air Force Institute of Technology Ohio 2012 P. 186.
9. **Shockley J.A.** Navigation of Ground Vehicles Using Magnetic Field Variations /J.A. Shockley J. F. Raquet // Journal of The Institute of Navigation Vol. 61 No. 4, 2014 P.237-252.
10. **Canciani A. J.** Absolute Positioning Using the Earth's Magnetic Anomaly Field/A. J. Canciani J. F. Raquet//Proceedings of the Institute of Navigation 2015 International Technical Meeting. - 2015. P. 265-278.
11. **Демина И.М., Петрова А.А.** Качество прогноза векового хода главного геомагнитного поля и его влияние на создание сводных карт аномального магнитного поля России. Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2010. № 1 (15), с. 206-215.
12. **Могилевкин В.А., Аверкиев В.В., Герловин М.С., Кандзюба С.Л., Осмоловский В.Н.** Компенсация магнитных помех авиационных носителей. Разведка и охрана недр. - 2001. - Т. 9 - С. 52–58.
13. **Голован А.А., Парусников Н.А.** Математические основы навигационных систем. Часть 1. – М.: Макс Пресс. 2011. –136 с.
14. **Богданов О. Н., Голован А. А.** Об имитации идеальных показаний датчиков БИНС при произвольном движении объекта // Труды МИЭА. - 2013. - № 6. - С. 46–59.
15. **Степанов О.А.** Методы оценки потенциальной точности в корреляционно-экстремальных навигационных системах. СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 1993. - 85 с.