

УДК 389.14 (621.371)

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЁХЧАСТОТНЫХ ГНСС-ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Т. Чепиль, А. Олейник, А. Прокопов
Национальный научный центр “Институт метрологии”, Харьков

И. Тревого
Национальный университет “Львівська політехніка”

Постановка проблемы

В последние годы в мире выполнено большое количество исследований структуры магнитного поля Земли. Вся совокупность современных экспериментальных данных о магнитном поле, полученных по измерениям магнитного поля на поверхности Земли и в окружающем пространстве, позволяет представить геомагнитное поле как комбинацию нескольких составляющих, порождаемых разными источниками. Более 95 % величины измеряемого на поверхности Земли магнитного поля генерируется в ядре планеты. Эта часть геомагнитного поля носит название главного поля. Токи, текущие в ионосфере Земли, также вносят вклад в геомагнитное поле (порядка 2 %). Иные источники, такие как местные магнитные аномалии земной коры, электрические токи, текущие в коре или верхней мантии и другие локальные источники, дают вклад в геомагнитное поле примерно 1–2 % [1, 2].

В настоящей работе проведен анализ возможности восстановления структуры геомагнитного поля на основе применения радиофизических методов, опирающихся на решение обратных задач теории распространения электромагнитных волн, когда по характеристикам электромагнитной волны, прошедшей среду, восстанавливаются характеристики среды. Показано, что на практике такой подход в простейшем случае может быть реализован на основе 3-частотных ГНСС-измерений.

Связь с важными научными и практическими заданиями

Исследования структуры магнитного поля Земли, помимо научного, познавательного значения являются актуальными для таких приложений, как:

- спутниковая навигация;
- радиолокация;
- предупреждение техногенных катастроф;
- разведка полезных ископаемых;
- диагностика и прогноз электромагнитного состояния околоземного пространства;
- определение точного местоположения магнитных полюсов Земли.

Целью вышеуказанных исследований является построение математических моделей магнитного поля Земли. Имея модель земной магнитосферы, можно с высокой точностью определять параметры геомагнитного поля в любой точке планеты.

Для повышения достоверности результатов моделирования используются как данные от широкой сети наземных станций, так и измерения осуществляемые с использованием космических ракет и искусственных спутников Земли (ИСЗ). Такой подход требует привлечения высоких технологий и значительных финансовых затрат, поэтому исследования магнитного поля ведутся в рамках международных научных программ при широкой кооперации ученых из разных стран.

Существует большое количество аналитических и численных моделей магнитного поля Земли, которые разрабатываются различными геофизическими организациями. Известны, например, региональные геомагнитные модели, описывающие главное поле только для отдельно взятых стран. В масштабах всей планеты разрабатываются глобальные модели, которые имеют разное назначение. Одни из них не очень точны, но применимы на больших временных интервалах, другие имеют прецизионную точность в определенный момент времени и требуют постоянного уточнения. Среди множества моделей выделяют некоторые глобальные модели, которые принимаются международными коллективами геофизиков в качестве универсальных.

Анализ последних достижений и публикаций

Основное магнитное поле Земли может быть математически смоделировано. В настоящее время основными моделями являются Международное эталонное геомагнитное поле (“International Geomagnetic Reference Field”, *IGRF*) и Мировая магнитная модель (“World Magnetic Model”, *WMM* [1, 2]). Модель *IGRF* разработана группой исследователей из Международной Ассоциации Геомагнетизма и Аэронауки, *WMM* – Геологическим информационным агентством США. Указанные модели описывают главное поле Земли и его вековые вариации. Как правило, параметры моделей обновляются каждые пять лет. К недостаткам известных моделей можно отнести:

- данные модели геомагнитных полей учитывают только длинноволновые пространственные колебания, создающиеся в земном ядре. Они не описывают средние и коротковолновые колебания, создающиеся в земной коре и мантии. Следовательно, при практическом использовании таких моделей могут возникать ошибки в склонениях и уклонах на несколько градусов в различных местах на поверхности Земли (в основном над сушей, по краям континентов, над горами и крупными впадинами). Однако на поверхности океана среднеквадратическая ошибка отклонения реальных данных от такой модели (в рамках соответствующего промежутка времени) составляет примерно 0.5 градусов.

- для моделей *IGRF*, *WMM* и подобных им характерны сложность экспериментальной реализации, необходимость разработки и запуска специальных ИСЗ, оснащенных дополнительными приборами наблюдения и регистрации – магнитометрами, регистраторами высокоэнергичных частиц т.д.;

Основным недостатком аналитических моделей является отсутствие информации о действительных значениях входящих в них параметров.

Постановка задачи

В предлагаемом методе для описания магнитного поля Земли используется математическое представление World Magnetic Model. Однако для определения параметров *WMM* планируется использовать данные не точечных измерений с использованием магнитометров, а интегральные данные (отражающие вклад всего пространственного профиля магнитного поля на пути электромагнитной волны), полученные в результате многочастотных ГНСС-измерений. Возможность такого подхода определяется тем, что магнитное поле влияет на величину задержки ГНСС-сигналов при прохождении ионосферы (поскольку задержка сигнала зависит от коэффициента преломления ионосферы, который в свою очередь, зависит от параметров магнитного поля).

Изложение основного материала

Рассмотрим теоретические основы предлагаемого подхода. Результатом однократного измерения с помощью ГНСС является псевдодальность S_i сигнала на каждой из несущих частот f_i ($i = 1, \dots, k$, k – количество несущих частот). Связь псевдодальности с коэффициентом преломления

ионосферы (если не рассматривать другие влияющие факторы) может быть представлена криволинейным интегралом вдоль траектории распространения сигнала [3, 4]:

$$S_i = \int_{\sigma(f_i)} n(f_i) d\sigma, \quad (1)$$

где $\sigma(f_i)$ – траектория сигнала с частотой f_i ; $n(f_i)$ – коэффициент преломления ионосферы на частоте f_i .

Формула для коэффициента преломления может быть представлена разложением величины $n(f_i)$ в ряд Тейлора по обратным степеням частоты [4], и в случае фазовых измерений имеет вид:

$$n = 1 - \frac{C_x}{2f_i^2} N_e - \frac{C_x C_y}{2f_i^3} N_e \cdot H_0 \cos \theta - \frac{C_x^2}{8f_i^4} N_e^2 - \dots, \quad (2)$$

где

$$C_x = \frac{e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m}, \quad C_y = \frac{\mu_0}{2\pi m},$$

здесь N_e – электронная концентрация; e – заряд электрона; m – масса электрона; ϵ_0, μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемость вакуума; H_0 – величина геомагнитного поля; θ – угол между H_0 и направлением распространения сигнала (последние слагаемые в (2) учитывают вклад эффектов высших порядков малости).

С помощью (2) получим выражение для псевдодальности S_i в общем виде (3):

$$S_i = L_i - \left(\frac{C_x}{2f_i^2} \int_{\sigma(f_i)} N_e d\sigma + \frac{C_x C_y}{2f_i^3} \int_{\sigma(f_i)} H_0 \cos \theta \cdot N_e d\sigma + \frac{C_x^2}{8f_i^4} \int_{\sigma(f_i)} N_e^2 d\sigma + \dots \right), \quad (3)$$

где $L_i = \int_{\sigma(f_i)} d\sigma$ – длина траектории сигнала с частотой f_i при его распространении от спутника до приемника.

Обычно в расчетах используют спрямленные траектории распространения и учитывают в разложении коэффициента преломления в ряд Тейлора лишь единицу и слагаемое, обратно пропорциональное f^2 . Для получения информации о геомагнитном поле в разложении коэффициента преломления ионосферы необходимо учесть еще и слагаемое, пропорциональное $H_0 \cos \theta \cdot N_e$. Если считать траектории распространения сигналов прямолинейными [4], то в уравнении (3) имеем три неизвестных: L , $\int_{\bar{\sigma}} N_e d\bar{\sigma}$ и $\int_{\bar{\sigma}} H_0 \cos \theta \cdot N_e d\bar{\sigma}$. Для их отыскания необходимо получить псевдодальность на трех несущих частотах, чтобы сформировать систему 3-х уравнений вида (3).

Найденное значение величины $\int_{\bar{\sigma}} H_0 \cos \theta \cdot N_e d\bar{\sigma}$ необходимо связать с конкретной моделью геомагнитного поля. При использовании *WMM* в качестве базовой модели будем иметь дело с формулами, которые представляют собой набор сферических гармонических коэффициентов для усеченного разложения в ряд геомагнитной функции потенциала V и ее производной по времени

[1, 2]. Учитывая, что магнитное поле является градиентом этого потенциала, напряженность магнитного поля B имеет вид [5]:

$$\begin{aligned}
 B = & -\sum_{n=1}^N \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos(m\lambda) + h_n^m(t) \sin(m\lambda)) \frac{dP_n^m(\sin \varphi)}{d\varphi} + \\
 & \frac{1}{\cos \varphi} \sum_{n=1}^N \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m (g_n^m(t) \sin(m\lambda) - h_n^m(t) \cos(m\lambda)) P_n^m(\sin \varphi) \\
 & - \sum_{n=1}^N (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos(m\lambda) + h_n^m(t) \sin(m\lambda)) P_n^m(\sin \varphi) ,
 \end{aligned} \quad (4)$$

здесь $a = 6371,2$ км – стандартный магнитный радиус Земли; (φ, λ, r) – широта, долгота и радиус в сферической геоцентрической системе отсчета; $(g_n^m(t), h_n^m(t))$ – зависящие от времени коэффициенты Гаусса со степенью n и порядком m ; $P_n^m(\sin \varphi)$ – квазинормированные (по Шмидту) присоединенные функции Лежандра.

Теперь необходимо (4) помножить на $N_e(r) \cos \theta$ и вычислить интеграл от этого произведения вдоль траектории распространения ГНСС-сигнала, учитывая, что $B = \mu_0 H_0$. Таким образом, получим уравнения для определения неизвестных $g_n^m(t), h_n^m(t)$.

$$\begin{aligned}
 \mu_0 \int_{\sigma} H_0 \cos \theta \cdot N_e d\sigma = & -\sum_{n=1}^N \int_{\sigma} \left[\left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos(m\lambda) + h_n^m(t) \sin(m\lambda)) \frac{dP_n^m(\sin \varphi)}{d\varphi} \right] \cdot N_e(r) \cos \theta dr \\
 & \frac{1}{\cos \varphi} \sum_{n=1}^N \int_{\sigma} \left[\left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m \cdot (g_n^m(t) \sin(m\lambda) - h_n^m(t) \cos(m\lambda)) P_n^m(\sin \varphi) \right] \cdot N_e(r) \cos \theta dr \\
 & - \sum_{n=1}^N (n+1) \int_{\sigma} \left[\left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos(m\lambda) + h_n^m(t) \sin(m\lambda)) P_n^m(\sin \varphi) \right] \cdot N_e(r) \cos \theta dr ,
 \end{aligned} \quad (5)$$

где величина $\mu_0 \int_{\sigma} H_0 \cos \theta \cdot N_e d\sigma$ определена из системы уравнений вида (3) по данным ГНСС-измерений.

Полученное выражение довольно сложное, поэтому задача решается не аналитически, а с использованием численных методов.

В этих уравнениях будут присутствовать коэффициенты вида $\int \frac{1}{r^{n+2}} \cos(m\lambda) \cos \theta \cdot N_e(r) dr$, $\int \frac{1}{r^{n+2}} \cdot N_e(r) \cdot \cos \theta \cdot \sin(m\lambda) \cdot P_n^m(\sin \varphi) dr$, $\int \frac{1}{r^{n+2}} \cdot N_e(r) \cdot \cos \theta \cdot \sin(m\lambda) \cdot (dP_n^m(\sin \varphi) / d\varphi) dr$, которые могут быть предварительно определены с учетом известных связей угла θ с углами λ, φ [6] при использовании имеющихся в Интернет данных о функции $N_e(r)$.

Необходимое количество уравнений (для определения всех $g_n^m(t), h_n^m(t)$), получим, осуществляя вышеописанную процедуру с использованием результатов достаточного количества ГНСС наблюдений, полученных при различных положениях ИСЗ при его прохождении над наблюдателем.

Таким образом, в рамках описанной процедуры задача моделирования сводится к нахождению коэффициентов разложения (коэффициентов Гаусса) – $g_n^m(t), h_n^m(t)$ из системы уравнений, полученной с использованием достаточного количества ГНСС наблюдений.

Выводы

Предложен радиофизический метод определения пространственной структуры магнитного поля Земли, по результатам 3-х частотных ГНСС-измерений.

Для оценки потенциальной точности метода, а также оценки требований к точности измерений при экспериментальной реализации предлагаемого метода, необходимо провести численный эксперимент с использованием полученных в настоящей работе соотношений и исходных расчетных параметров, соответствующих перспективной европейской спутниковой системе Галилео.

Литература

1. Olsen, N., Sabaka T.J. and Lowes F. New parameterization of external and induced fields in geomagnetic field modelling and a candidate model for IGRF// Earth, Planets and Space. 2005, 57. – P. 1141–1149.
2. McLean S., Macmillan S., Maus S., Lesur V., Thomson A., and Dater D. Desember 2004, The US/UK World Magnetic Model for 2005–2010, NOAA Technical Report NESDIS/NGDS-1. <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/WMM/>.
3. Олейник А.Е., Прокопов А.В. Методы учета влияния рефракционных ионосферных эффектов второго порядка на результаты GPS-измерений // Украинский метрологический журнал, Вип.4. – 2003. – С. 22–24.
4. Z. Wang, Y.Wu, K. Zhang. Triple-Frequency Method for High-Order Ionospheric Refractive Error Modelling in GPS Modernization // Presented at GNSS 2004, The 2004 International Symposium on GNSS/GPS in Sydney, Australia, 6–8 December 2004.
5. А.В. Прокопов, А.Е. Олейник, Т.А. Чепиль. Анализ возможности использования 3-частотных ГНСС-измерений для восстановления пространственной структуры магнитного поля Земли // Наук. пр. VI Міжнар. наук.-техн. конф. “Метрологія та вимірювальна техніка–2008”. – Т. 1, Харків: ННЦ “Інститут метрології”, 2008. – С. 155–158.
6. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Р., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Пер. з англ. третього вид. під ред. Я.С. Яцківа. – К.: Наукова думка. – 1995. – 380 с.

Аналіз можливості використання тричастотних ГНСС-вимірювань для відновлення просторової структури магнітного поля Землі

Т. Чепіль, А. Олійник, О. Прокопов, І. Тревого

Теоретично обґрунтовано можливість відновлення просторової структури магнітного поля Землі за результатами тричастотних ГНСС вимірювань.

Анализ возможности использования трёхчастотных ГНСС-измерений для восстановления пространственной структуры магнитного поля Земли

Т. Чепиль, А. Олейник, А. Прокопов, И. Тревого

Теоретически обоснована возможность восстановления пространственной структуры магнитного поля Земли по результатам трёхчастотных ГНСС измерений.

The possibility of recovering of Earth’s magnetic field structure by GNSS is analyzed

T. Chepil, A. Oliinyk, A. Prokopov, I. Trevogo

The possibility of recovering the Earth’s magnetic field structure using 3-frequency GNSS measurement is described.