

МЕТОД МУЛЬТИПОЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ ПЛАНЕТ

© В. В. Дегтярев, А. В. Дегтярев

Харківський державний технічний університет радіоелектроніки

Розроблено метод вимірювань мультипольних магнітних моментів планети, оснований на використанні значень складових напруженості магнітного поля, вимірюваних в ряді точок пролітної траєкторії штучного супутника. Приводяться рівняння вимірювань і дається оцінка похибок вимірювань.

При анализе внешних магнитных полей различных объектов, в том числе и планет, используют модель источника поля в виде эксцентричного наклонного диполя. Такая модель является наиболее адекватной и в полной мере позволяет применить мультипольную теорию. В соответствии с этой теорией магнитное поле источника в области внешнего пространства рассматривается как сумма отдельных пространственных гармоник и математически описывается сферическим гармоническим рядом Гаусса [1]:

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{1}{R^{n+1}} (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) P_n^m(\cos\theta),$$

где g_{nm} , h_{nm} — постоянные для данного источника поля коэффициенты ряда, равные мультипольным магнитным моментам; $P_n^m(\cos\theta)$ — присоединенные полиномы Лежандра; n — номер мультиполя или пространственной гармоники; m — номер элементарного мультиполя гармоники n -го порядка. Измерение параметров внешнего магнитного поля источника сводится к задаче измерения его мультипольных магнитных моментов g_{nm} , h_{nm} .

С этой целью на основе мультипольной теории разработаны точечные методы измерения. Эти методы ориентированы на использование ряда контрольных точек внешнего пространства — точек наблюдения, в которых определяются значения компонентов напряженности магнитного поля.

Компоненты напряженности магнитного поля связаны с потенциалом известными соотношениями:

$$H_R = -\frac{\partial U}{\partial R}, \quad H_\varphi = \frac{-1}{R \sin\theta} \frac{\partial U}{\partial \varphi},$$

$$H_\theta = \frac{-1}{R} \frac{\partial U}{\partial \theta}.$$

По результатам их измерения определяются ис-

комые магнитные моменты с заданной точностью.

В стационарных условиях методы получили реализацию в виде точечных средств измерительной техники, представляющих собой измерительное устройство в виде группы точечных датчиков, соединенных электрически и сконфигурированных в пространстве определенным образом. Электрический сигнал такого измерительного устройства поступает для дальнейшей обработки на цифровой вычислитель, ядром которого является микроконтроллер или микроЭВМ.

Использование модели эксцентричного наклонного диполя и мультипольной теории поля при исследовании магнитных полей планет позволяет распространить применение разработанных точечных методов для измерения магнитных моментов планет. При этом используются значения компонентов напряженности магнитного поля планеты, измеренные в определенных точках пролетной траектории искусственного спутника.

На рис. 1 схематически изображена орбита спутника и контрольные точки наблюдения. В качестве примера рассматривается задача определения дипольных и квадрупольных моментов Земли и координат эксцентриситета диполя.

Для нахождения указанных параметров можно применить четырехточечный магнитометрический метод, использующий результаты измерения радиального и осевого компонентов напряженности магнитного поля в точках орбиты спутника (рис. 1).

Предлагается в точках орбиты 1—4 измерять компоненты напряженности с помощью двухкомпонентных датчиков. Согласно рис. 1 взаимная ориентация радиальных датчиков относительно системы координат XYZ , связанной с измеряемым объектом, указана стрелками, осевых — крестиками, ось Z ориентирована перпендикулярно к плоскости орбиты.

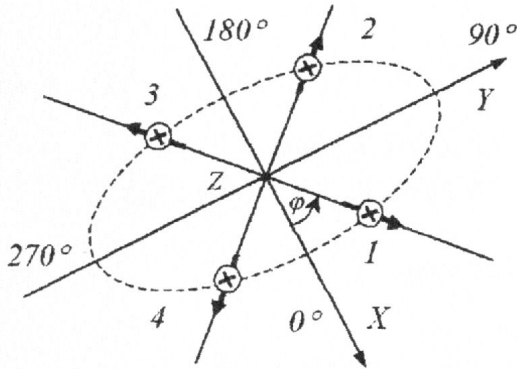


Рис. 1. Схема расположения точек наблюдения

Измеряемая радиальная и осевая компоненты напряженности магнитного поля объекта описываются соответственно уравнениями

$$H_R = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{n+1}{R^{n+2}} (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) P_n^m(\cos\theta),$$

$$H_{\theta} = -\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{1}{R^{n+2}} (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^m(\cos\theta).$$

По результатам измерения радиальных H_{iR} и осевых $H_{i\theta}$ компонентов напряженности в точках $i = 1 \dots 4$, угловые координаты которых принимают значения $\varphi_i = 45^\circ(2i - 1)$ и $\theta = 90^\circ$, определяем дипольные ($n = 1, m = 0, 1$) и квадрупольные магнитные моменты ($n = 2, m = 0, 1$) источника по следующему алгоритму:

— магнитные моменты зональной и секториальной гармоник первого порядка

$$M_x = g_{11} = \frac{R^3}{4\sqrt{2}} (H_{1R} - H_{2R} - H_{3R} + H_{4R}),$$

$$M_y = h_{11} = \frac{R^3}{4\sqrt{2}} (H_{1R} + H_{2R} - H_{3R} - H_{4R}),$$

$$M_z = g_{10} = \frac{R^3}{4} \sum_{i=1}^4 H_{i\theta};$$

— магнитные моменты зональной и тессеральной гармоник второго порядка

$$M_{20}^z = g_{20} = \frac{R^4}{6} \sum_{i=1}^4 H_{iR},$$

$$M_{21}^x = g_{21} = \frac{R^4}{6\sqrt{2}} (H_{1\theta} - H_{2\theta} - H_{3\theta} + H_{4\theta}),$$

$$M_{21}^y = h_{21} = \frac{R^4}{6\sqrt{2}} (H_{1\theta} + H_{2\theta} - H_{3\theta} - H_{4\theta}).$$

По измеренным значениям компонентов диполь-

ного магнитного момента источника поля можно определить модуль вектора дипольного момента источника поля и его направляющие косинусы:

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2},$$

$$\cos\alpha = \frac{M_x}{M}, \quad \cos\beta = \frac{M_y}{M}, \quad \cos\gamma = \frac{M_z}{M}.$$

Для нахождения координат эксцентричного дипольного момента M по результатам измерения квадрупольных магнитных моментов секториальной и тессеральной гармоник магнитного поля составляется система из трех уравнений:

$$M_{20}^z = -M_x x_0 - M_y y_0 + 2M_z z_0,$$

$$M_{21}^x = M_x x_0 + M_z z_0,$$

$$M_{21}^y = M_y z_0 + M_z y_0,$$

которая может быть записана в виде матричного уравнения

$$||M_{\tau}|| \cdot ||\tau_0|| = ||M_{2m}^{\tau}||,$$

где $\tau = x, y, z$; $\tau_0 = x_0, y_0, z_0$; $||M_{\tau}||$ — матрица коэффициентов при неизвестных координатах x_0, y_0, z_0 .

Решением последнего уравнения относительно матрицы $||\tau_0||$ будет

$$\begin{vmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{vmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} M_{20}^z \\ M_{21}^x \\ M_{21}^y \end{vmatrix},$$

где Δ — определитель из элементов матрицы

$$\Delta = \begin{vmatrix} -M_x & -M_y & 2M_z \\ M_z & 0 & M_x \\ 0 & M_z & M_y \end{vmatrix};$$

A_{nk} — коэффициенты, связанные с минором M_{nk} уравнением

$$A_{nk} = (-1)^{n+k} M_{nk},$$

(n, k — соответственно номер строки и столбца определителя Δ).

По результатам найденных параметров эксцентричного магнитного диполя определяем квадрупольные магнитные моменты секториальной гармоники магнитного поля второго порядка ($n = 2, m = 2$) исследуемого объекта по формулам

$$M_{22}^x = g_{22} = \frac{1}{2} (M_x x_0 - M_y y_0),$$

$$M_{22}^y = h_{22} = \frac{1}{2} (M_x y_0 + M_y x_0).$$

Погрешность измерения дипольных моментов определяется влиянием помехонесущих мультиполей нечетных порядков $n = 3, 5, \dots$, из которых основной вклад вносит неисключенный остаток мультиполя третьего порядка. В связи с этим представляет интерес оценка этой погрешности по гармонике $n = 3$. В относительном виде эта погрешность равна

$$\delta_x = -\frac{6}{M_x R^2} (0.5g_{31} + 5g_{33}),$$

$$\delta_y = \frac{6}{M_y R^2} (-0.5h_{31} + 5h_{33}),$$

$$\delta_z = \frac{3}{2M_z R^2} g_{30}.$$

Квадрупольные магнитные моменты определяются с погрешностью, создаваемой помехонесущими мультиполями четного порядка $n = 4, 6, \dots$. Основной вклад в погрешность вносит мультиполь четвертого порядка:

$$\delta_{20}^z = -\frac{10}{M_{20}^z R^2} (0.125g_{40} - 35g_{44}),$$

$$\delta_{21}^x = -\frac{5}{M_{21}^x R^2} (0.5g_{41} + 7g_{43}),$$

$$\delta_{21}^y = \frac{5}{M_{21}^y R^2} (-0.5h_{41} + 7h_{43}).$$

Значения данной погрешности, классифицируемой как методическая, остаются неопределенными, так как для измеряемого объекта заранее не известны значения магнитных моментов мультиполей. Поэтому оценка этой погрешности выполнена для источника поля, магнитный диполь которого расположен, в частности, на оси Z .

Квадрупольные, октупольные и седесимупольные магнитные моменты такого источника, найденные расчетным путем, будут равны:

— для гармоники $n = 2$

$$M_{20}^z = 2M_z z_0, \quad M_{21}^x = M_x z_0,$$

$$M_{21}^y = M_y z_0;$$

— для гармоники $n = 3$

$$g_{30} = 3M_z z_0^2, \quad g_{31} = M_x z_0^2, \quad h_{31} = M_y z_0^2;$$

$$g_{33} = h_{33} = 0;$$

— для гармоники $n = 4$

$$g_{40} = 4M_z z_0^3, \quad g_{41} = M_x z_0^3, \quad h_{41} = M_y z_0^3,$$

$$g_{43} = h_{43} = g_{44} = 0.$$

В этом случае мультипольная составляющая методической погрешности вычисляется по формулам

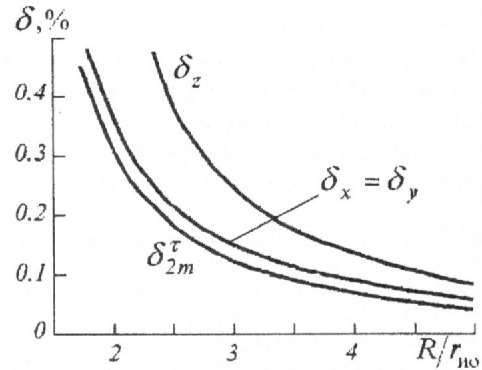


Рис. 2. Мультипольная погрешность измерения дипольных и квадрупольных магнитных моментов Земли

$$\delta_x = \delta_y = 3 \left(\frac{k_3}{R/r_{ио}} \right)^2,$$

$$\delta_z = \frac{9}{2} \left(\frac{k_3}{R/r_{ио}} \right)^2,$$

$$\delta_{2m}^{\tau} = \frac{5}{2} \left(\frac{k_3}{R/r_{ио}} \right)^2,$$

где $\tau = x, y, z$; $m = 0, 1$; $k_3 = z_0/r_{ио}$ — коэффициент эксцентricности дипольного момента источника поля; $r_{ио}$ — радиус исследуемого объекта.

На рис. 2 построены графические зависимости мультипольной составляющей погрешности $\delta = f(R/r_{ио})$ при значении коэффициента эксцентricности магнитного диполя Земли $k_3 = 0.07$, из которых следует, что погрешность четырехточечного магнитометрического метода измерения дипольных и квадрупольных магнитных моментов источника на расстоянии его пяти радиусов не превышает 0.1 %.

ВЫВОДЫ

1. Получены уравнения для определения магнитных моментов порядка $n = 1, 2$ и координат магнитного диполя источника по результатам измерения его напряженности поля с помощью ИСЗ по методу четырех точек.

2. Получены математические модели погрешностей измерения магнитных моментов, представленные в виде функции от расстояния до точек наблюдения и радиуса исследуемого источника, вследствие чего можно определить оптимальные соотношения этих параметров для обеспечения заданной точности.

3. Дальнейшее повышение точности метода при

одновременном уменьшении расстояния измерения может быть достигнуто за счет снижения влияния помехонесущих мультиполей до заданного n -го порядка путем увеличения количества точек, в которых следует производить измерения напряженности магнитного поля исследуемого объекта.

1. Яновский Б. М. Земной магнетизм. — Л.: ЛГУ, 1978.—592 с.
2. Сарычев В. А., Овчинников М. Ю. Магнитные системы ориентации искусственных спутников Земли. — М., 1985.—104 с.— (Итоги науки и техники. Сер. Исследование космического пространства; Т. 23).
3. Долгинов Ш. Ш. Магнетизм планет. — М., 1982.—132 с.—

(Итоги науки и техники. Сер. Исследование космического пространства; Т. 18).

METHOD OF MULTIPOLE ANALYZES FOR DETERMINATION OF PLANET'S MAGNETIC MOMENTS

V. V. Degtiariov, A. V. Degtiariov

The measurement method of planet's multipole magnetic moments was worked out. It's based on used of value of magnetic field strength components, which were measured in several points of artificial satellite's flying path. The equation of measurements and estimation of measurement errors are proposed.

УДК 621.398.626

РЕГИСТРАЦИЯ, ОБРАБОТКА И КОНТРОЛЬ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

© А. Л. Макаров, А. В. Храпач

Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля

Йдеться про методологію розробки програмного забезпечення реєстрації, обробки і контролю телеметричної інформації для робочих станцій на базі процесора Intel Pentium.

В настоящее время наблюдается тенденция к использованию рабочих станций (РС), позволяющих осуществлять прием и обработку телеметрической информации (ТМИ). В связи с этим разрабатываются программы, производящие ее регистрацию и обработку. Однако большинство из созданных программ не могут обеспечить полную обработку или производят ее в отложенном времени, что является неприемлемым для контроля информации непосредственно при работе с агрегатами контролируемых изделий. Также некоторые программные продукты не обладают достаточной эксплуатационной надежностью, т. е. при приеме телеметрической информации происходят различного рода потери информации. Ввиду изложенных недостатков возникает необходимость создания нового программного обеспечения, позволяющего решить как текущие, так и новые задачи для более детального и оперативного анализа телеметрической информации.

К программному обеспечению предъявляются следующие требования:

1. Обеспечение надежной регистрации телеметрической информации;
2. Запись данных на жесткие носители;
3. Предварительная обработка потока телеметрической информации;

4. Запись обработанного потока данных;
5. Анализ достоверности полученных данных;
6. Контроль данных в соответствии с техническим заданием;
7. Вывод полученных результатов на средства индикации для дальнейшего анализа информации оператором РС;
8. Простота в эксплуатации;
9. Максимальная автоматизация процесса регистрации, обработки и контроля телеметрической информации;
10. Возможность быстрой настройки;
11. Возможность обработки телеметрической информации в отложенном времени;
12. Возможность передачи обработанных массивов через телекоммуникационные каналы связи.

На сегодняшний день программное обеспечение разрабатывается согласно схеме, показанной на рис. 1.

Как показал опыт, построение программного обеспечения по данной схеме обладает несколькими недостатками:

— при приеме телеметрической информации могут происходить потери данных. Процессы регистрации и преобразования проходят неравномерно во времени. При малейшей задержке в системе текущая информация может быть перекрыта новой, и