

3. Давыдочкин В. М. Методы снижения погрешности оценки параметров полигармонических сигналов в ближней частотной радиолокации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2006. Вып. 18. С. 63—70.

4. Давыдочкин В. М. Преобразование Фурье в задаче измерения расстояния частотным дальномером в пространстве с дисперсией // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 1. С. 66—70.

5. Давыдочкин В. М., Давыдочкина С. В. Весовые функции для цифрового адаптивного гармонического анализа сигналов // Радиотехника. 2009. № 9. С. 11—20.

6. Пат. 2435168 РФ. Способ гармонического анализа периодического многочастотного сигнала / В. М. Давыдочкин, С. В. Давыдочкина // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 33.

Дата принятия: 23.11.2015.

51-74:621.317.49

Магнитно-инерциальный метод определения относительного положения и ориентации объекта

Е. С. ЧЕРНЫШОВ, ЕН УН ЧЬЕ

Тихоокеанский государственный университет
Хабаровск, Россия, e-mail: neer.moar@gmail.com

Описан метод определения положения и ориентации объекта в переменном магнитном поле, генерируемом двумя плоскими катушками индуктивности, которые расположены горизонтально в одной плоскости. Приведён алгоритм вычисления положения и ориентации измерительного модуля, состоящего из трёхосевых датчика переменного магнитного поля и микроэлектромеханического акселерометра.

Ключевые слова: относительное позиционирование, переменное магнитное поле, планарный генератор поля, акселерометр.

A technique is described for tracking of an object position and orientation in an alternating magnetic field, produced by two horizontal coplanar flat coils. The algorithm is given for the calculating of position and orientation of the measurement module, comprising a triaxial alternating magnetic field sensor and triaxial MEMS accelerometer.

Key words: relative position, alternating magnetic field, planar field generator, accelerometer.

Технологии определения положения и ориентации объектов в искусственном магнитном поле в настоящее время активно применяются в медицине, тренажёрных системах и военной технике, а также набирают популярность в потребительской сфере. Их ключевые преимущества (в части позиционирования и навигации) перед оптическими, ультразвуковыми и радиочастотными технологиями — высокая робастность, отсутствие теневых зон, простота организации процесса измерений. Области применения, а также классификация магнитных технологий позиционирования подробно рассмотрены в [1].

Большинство существующих магнитных систем позиционирования (МСП) основано на классическом методе [2] — использовании генератора поля, состоящего из трёх взаимно перпендикулярных катушек индуктивности (источников поля). Данная конфигурация обеспечивает оптимальную структуру создаваемого поля и наибольшую рабочую область, однако не лишена недостатков, один из которых — относительная сложность изготовления генератора поля. Значительные габаритные размеры такого генератора ограничивают возможности встраивания и портативного использования системы.

Известны также МСП, в которых применяют плоский распределённый генератор поля, состоящий из трёх или пяти источников, размещённых в одной плоскости [3, 4]. Измери-

тельный модуль в указанных системах представлен соответственно трёх- или однокомпонентным магниточувствительным датчиком. Подобные системы в основном применяют для навигации инвазивного медицинского инструмента из-за минимальных размеров датчика и удобной конфигурации генератора. К недостаткам данных МСП можно отнести сложность структуры и большую площадь генератора поля, что повышает стоимость их производства и ограничивает область применения.

В данной статье описан гибридный метод определения положения и ориентации объекта, использующий комбинацию компонентов МСП и инерциальных навигационных систем. Ключевая особенность метода — компактная планарная конфигурация источников поля, легко реализуемая на многослойной печатной плате. Небольшая рабочая область, в пределах 5—10 диаметров источников поля, может быть использована для решения следующих задач: позиционирования частей тела оператора и инструмента в различных тренажёрных системах, взаимодействия с системами виртуальной и дополненной реальности и т. д.

Предлагаемый метод в значительной степени опирается на метод, представленный в [5, 6], однако проведена попытка исправить ряд его недостатков. При этом идея использования компактного и простого в изготовлении генератора магнитного поля и гибридного измерительного мо-

дуля сохранена. Переменное магнитное поле, генерируемое двумя источниками, позволяет устранить влияние магнитных помех, создаваемых оборудованием, приборами, намагниченными конструкциями и локальными искажениями геомагнитного поля.

Геометрическая конфигурация компонентов системы. Генератор переменного магнитного поля состоит из генератора переменного тока и двух катушек индуктивности, расположенных горизонтально в одной плоскости, как показано на рис. 1. Такой генератор поля условно можно назвать планарным.

Взаимное смещение d центров катушек может быть любым, отличным от нуля. При этом увеличение смещения d пропорционально повышает точность определения горизонтальных координат измерительного модуля, но в то же время повышает требования к динамическому диапазону измерений, вследствие чего уменьшается размер рабочей области системы.

При выборе смещения d следует учитывать влияние взаимных наводок (переменное магнитное поле одной катушки индуцирует токи в другой катушке, которые искажают форму генерируемого магнитного поля). Этот эффект можно устранить, разместив катушки так, чтобы коэффициент их взаимной индукции был минимальным. Необходимое смещение d можно рассчитать или определить экспериментально.

Для измерений индукции переменного магнитного поля авторами предложена конфигурация из трёх измерительных катушек индуктивности, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Для уменьшения погрешности измерений катушки необходимо располагать как можно ближе друг к другу, наилучшим вариантом является их намотка на одно основание. Измерительный модуль должен включать трёхосевой акселерометр, установленный неподвижно относительно измерительных катушек. Это необходимое условие для описываемого в данной статье метода.

Теоретические основы метода. Под действием переменного магнитного поля источника в измерительных катушках индуцируется ЭДС. В соответствии с законом электромагнитной индукции амплитуда колебаний ЭДС

$$E_{\max} = 2\pi f N_s S_s B_{\max},$$

где f — частота колебаний магнитного поля; N_s , S_s — число витков обмотки и эффективная площадь контура измерительной катушки, соответственно; $B_{\max}$ — амплитуда компонент вектора магнитной индукции, создаваемой источником магнитного поля, направленной вдоль оси измерительной катушки.

Для выделения составляющей магнитного поля, соответствующей каждому источнику, можно использовать частотное или временное разделение их сигналов. После измерений ЭДС и вычисления компонент вектора магнитной индукции, направленных вдоль осей измерительных катушек X , Y , Z , получим векторы магнитной индукции $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{B}_2$ первого и второго источников поля, соответственно:

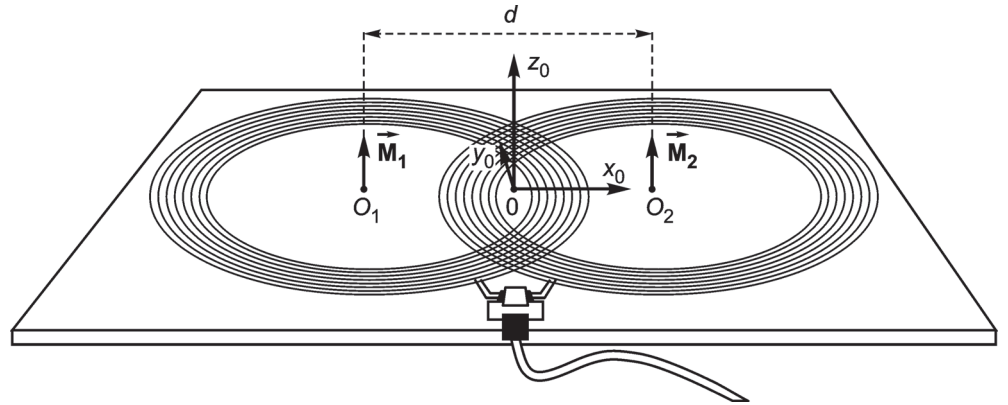


Рис. 1. Схема планарного генератора магнитного поля, изготовленного на многослойной печатной плате

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} B_{1x} \\ B_{1y} \\ B_{1z} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} B_{2x} \\ B_{2y} \\ B_{2z} \end{bmatrix}.$$

Вектор ускорения свободного падения $\mathbf{G}$ определим с помощью акселерометра, встроенного в измерительный модуль:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix}.$$

Векторы $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{B}_2$, $\mathbf{G}$ находятся в одной системе координат XYZ , связанной с измерительным модулем. Предположим, что оси акселерометра сонаправлены осям соответствующих измерительных катушек. Однако в общем случае необходимо переводить полученные векторы в одну систему координат, компенсируя взаимный поворот акселерометра и измерительных катушек.

В соответствии с [6] выражения для источника поля в форме круглой катушки индуктивности примут вид

$$r = |\mathbf{r}| = F(|\mathbf{B}|, \theta_b); \quad (1)$$

$$\theta = \angle(\mathbf{M}, \mathbf{r}) = J(|\mathbf{B}|, \theta_b); \quad (2)$$

$$\theta_b = \angle(\mathbf{B}, \mathbf{M}), \quad (3)$$

где r — длина радиус-вектора $\mathbf{r}$, соединяющего центральную точку источника с данной точкой; F — таблично заданная функция, характеризующая зависимость r от модуля вектора магнитной индукции $\mathbf{B}$ и угла θ_b ; θ_b , θ — полярные углы векторов $\mathbf{B}$, $\mathbf{r}$ в системе координат источника, соответственно; J — таблично заданная функция, характеризующая зависимость угла θ от модуля вектора $\mathbf{B}$ и угла θ_b ; $\mathbf{M}$ — магнитный момент.

В (1)–(3) $\theta_b \in [0; \pi]$ как угол между двумя векторами. Исходя из особенностей распределения магнитного поля катушки — $\theta \in [0; \pi/2]$. Независимо от того, в какой части полупространства относительно плоскости катушки находится действительная точка измерений, полученный угол θ будет соответствовать точке, находящейся выше плоскости катушки.

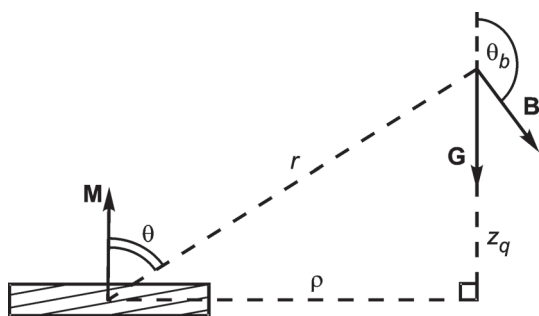


Рис. 2. Система координат источника поля

На рис. 2 приведена полярная система координат источника, используемая в функциях F , J , которые выполняют преобразование измеренного вектора $\mathbf{B}$ в координаты r , θ точки измерения.

Катушки генератора поля расположены горизонтально, следовательно, их магнитные моменты $\mathbf{M}_1$, $\mathbf{M}_2$ параллельны вектору $\mathbf{G}$. Пусть измерительный модуль находится в точке $Q(x_q, y_q, z_q)$ системы координат $X_0Y_0Z_0$, связанной с генератором, а центры катушек генератора находятся в точках $O_1(-d/2, 0, 0)$; $O_2(d/2, 0, 0)$. В соответствии с рис. 2 запишем

$$r_1 = |\mathbf{O}_1\mathbf{Q}| = F(|\mathbf{B}_1|, \theta_{b1}); \quad r_2 = |\mathbf{O}_2\mathbf{Q}| = F(|\mathbf{B}_2|, \theta_{b2});$$

$$\theta_1 = \angle(|\mathbf{M}_1, \mathbf{O}_1\mathbf{Q}|) = J(|\mathbf{B}_1|, \theta_{b1}); \quad \theta_2 = \angle(|\mathbf{M}_2, \mathbf{O}_2\mathbf{Q}|) = J(|\mathbf{B}_2|, \theta_{b2});$$

$$\theta_{b1} = \angle(|\mathbf{B}_1, \mathbf{M}_1|) = \pi - \angle(\mathbf{B}_1, \mathbf{G}); \quad \theta_{b2} = \angle(|\mathbf{B}_2, \mathbf{M}_2|) = \pi - \angle(\mathbf{B}_2, \mathbf{G}).$$

Углы $\angle(\mathbf{B}_1, \mathbf{G})$, $\angle(\mathbf{B}_2, \mathbf{G})$ найдём из скалярного произведения векторов:

$$\angle(\mathbf{B}_1, \mathbf{G}) = \arccos \frac{\mathbf{B}_1, \mathbf{G}}{|\mathbf{B}_1| |\mathbf{G}|}; \quad \angle(\mathbf{B}_2, \mathbf{G}) = \arccos \frac{\mathbf{B}_2, \mathbf{G}}{|\mathbf{B}_2| |\mathbf{G}|}.$$

Так как источники поля расположены в плоскости X_0Y_0 , то в соответствии с рис. 2 определим координату z_q точки Q как проекцию векторов $\mathbf{O}_1\mathbf{Q}$, $\mathbf{O}_2\mathbf{Q}$ на вертикальную ось z_0 :

$$|z_q| = r_1 \cos \theta_1 = r_2 \cos \theta_2.$$

Знак модуля показывает, что полученная координата остаётся положительной независимо от знака действительной координаты z_q , так как $\theta_1, \theta_2 \in [0; \pi/2]$. Рассматриваемый метод не позволяет напрямую определить знак координаты

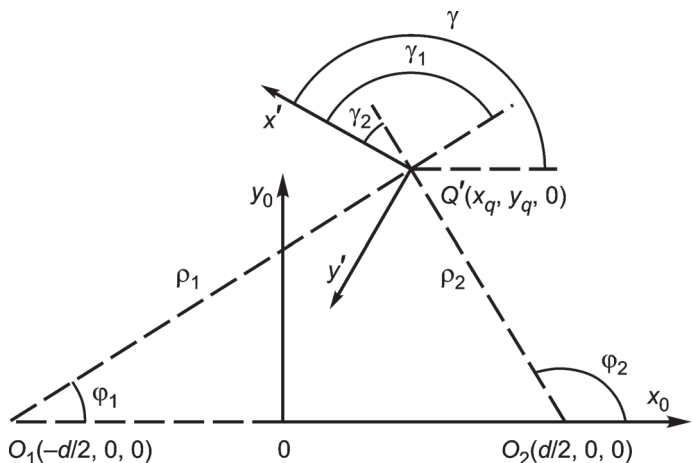


Рис. 3. Проекция точки Q на плоскость X_0Y_0

ты z_q , поэтому его рабочая область ограничена одним полупространством относительно плоскости X_0Y_0 .

Для определения координат z_q , y_q обозначим точку $Q'(x_q, y_q, 0)$ — проекцию точки Q на плоскость X_0Y_0 как показано на рис. 3. Запишем выражения для проекций векторов $\mathbf{O}_1\mathbf{Q}$, $\mathbf{O}_2\mathbf{Q}$ на плоскость X_0Y_0 :

$$\rho_1 = |\mathbf{O}_1\mathbf{Q}'| = r_1 \sin \theta_1; \quad \rho_2 = |\mathbf{O}_2\mathbf{Q}'| = r_2 \sin \theta_2.$$

Координаты x_q , y_q получим методом трилатерации:

$$x_q = (\rho_1^2 - \rho_2^2) / (2d);$$

$$y_q = \pm \sqrt{[(\rho_1^2 + \rho_2^2) / 2] - x_q^2 - (d^2 / 4)}.$$

Неопределённость знака координаты y_q может быть устранена после определения ориентации измерительного модуля. В соответствии с [6, 7] имеем следующие выражения для углов крена α , тангажа β и рыскания γ :

$$\alpha = \arctan 2 \left(\frac{-G_y}{-G_z} \right); \quad \beta = \arctan \left(\frac{G_x}{-G_y \sin \alpha - G_z \cos \alpha} \right);$$

$$\gamma_1 = \arctan 2 \left(\frac{B_{1z} \sin \alpha - B_{1y} \cos \alpha}{B_{1x} \cos \beta + B_{1y} \sin \beta \sin \alpha + B_{1z} \sin \beta \cos \alpha} \right);$$

$$\gamma_2 = \arctan 2 \left(\frac{B_{2z} \sin \alpha - B_{2y} \cos \alpha}{B_{2x} \cos \beta + B_{2y} \sin \beta \sin \alpha + B_{2z} \sin \beta \cos \alpha} \right),$$

где γ_1, γ_2 — углы рыскания системы координат измерительного модуля относительно векторов $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2$, соответственно.

Знак координаты y_q определим следующим образом: $y_q > 0$, если $\text{mod}(\gamma_1 - \gamma_2, 2\pi) < \pi$, и $y_q < 0$, если $\text{mod}(\gamma_1 - \gamma_2, 2\pi) > \pi$.

В соответствии с рис. 3 найдём угол рыскания γ системы координат измерительного модуля относительно системы координат генератора:

$$\gamma = \gamma_1 + \varphi_1 = \gamma_2 + \varphi_2; \quad (4)$$

$$\varphi_1 = \arctan 2 \left(\frac{y_q}{x_q + (d/2)} \right); \quad \varphi_2 = \arctan 2 \left(\frac{y_q}{x_q - (d/2)} \right),$$

где φ_1, φ_2 — углы между векторами $\mathbf{O}_1\mathbf{Q}'$, $\mathbf{O}_2\mathbf{Q}'$ и осью x_0 , соответственно.

Выражение (4) справедливо только для верхнего полупространства относительно плоскости X_0Y_0 . Перемещение измерительного модуля ниже плоскости X_0Y_0 приводит к изменению угла γ на π . Отслеживая скачкообразное изменение γ вблизи данной плоскости, можно определить знак координаты z_q в тот или иной момент времени и расширить рабочую область на всё пространство вокруг генератора магнитного поля.

Таким образом, пространственное положение и ориентация измерительного модуля полностью определены.

Практическая реализация метода. На основе описанного метода разработана система магнитно-инерциального позиционирования. Система включает источники переменного магнитного поля, генератор переменного тока, из-

мерительный модуль, модуль преобразования сигналов и сопряжения с персональным компьютером.

В системе используется частотное разделение источников поля. Выделение составляющей магнитного поля, соответствующей каждому источнику, производится с помощью дискретного преобразования Фурье. Измерительный модуль не синхронизирован с генератором поля. Возникающая при этом неопределённость фаз измеренных гармонических составляющих сигнала устраняется с помощью метода, описанного в [8].

Источники поля представляют катушки диаметром 168 мм, выполненные на двухсторонних печатных платах. Смещение между центрами катушек $d = 106,8$ мм. Катушки состоят из 82 витков проводника печатной платы. Амплитуда переменного тока катушек приближенно равна 50 мА. Чувствительные элементы представляют три ортогональных катушки индуктивности, намотанные на основание в форме куба со стороной 15 мм. Обмотка каждой катушки состоит из 850 витков провода.

Измерительный модуль содержит микросхему LSM6DS0 (STMicroelectronics, Швейцария), включающую трёхосевые акселерометр и гироскоп. Гироскоп в данной системе используется для устранения погрешности измерений акселерометром вектора ускорения свободного падения [9]. Эта погрешность вызвана собственным ускорением измерительного модуля. При частоте измерений 340 Гц среднее квадратическое отклонение измеренных координат составило менее 2 мм при размещении измерительного модуля на расстоянии 0—0,3 м от начала координат системы координат генератора, и менее 20 мм на расстоянии 0,3—0,8 м.

Заключение. Описанный в данной работе метод ориентирован на использование плоских источников магнитного поля, образующих планарный генератор поля. Такая конфигурация генератора позволяет значительно улучшить массогабаритные характеристики и снизить стоимость производства системы относительно существующих решений в области магнитного позиционирования. Однако возникает необходимость в дополнительных компонентах — трёхосевом акселерометре и гироскопе, для обеспечения высоких динамических характеристик системы. В результате развития технологий микроэлектромеханических систем указанные датчики представляют миниатюрные и недорогие интегральные схемы для поверхностного монтажа на печатную плату.

Работа выполнена при поддержке Тихоокеанского государственного университета (грант № 1.17.15—ТОГУ) на выполнение научно-исследовательских работ аспирантов и молодых научно-педагогических работников.

Л и т е р а т у р а

1. Желамский М. В. Электромагнитное позиционирование: преимущества и области применения // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2007. № 3. С. 96—101.
2. Raab F., Blood E., Steiner O., Jones H. Magnetic position and orientation tracking system // *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Sy.* 1979. V. 15, N. 5. P. 709—717.
3. Желамский М. В. Особенности создания поля позиционирования для локальной навигации в закрытых пространствах // *Измерительная техника*. 2014. № 7. С. 40—45.
4. Желамский М. В. Система навигации инвазивного инструмента // *Измерения в современном мире: сб. науч. тр. 5-й Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та*, 2015. С. 43—52.
5. Пат. 2542793 РФ. Устройство для определения положения объекта в пространстве / Чернышов Е. С. // *Изобретения. Полезные модели*. 2015. № 6.
6. Чье Е. У., Чернышов Е. С. Магнитно-инерциальный метод определения положения и ориентации объекта // *Вестник Тихоокеан. гос. ун-та*. 2014. № 1 (32). С. 69—78.
7. Implementing a Tilt-Compensated eCompass using Accelerometer and Magnetometer Sensors [Электронный ресурс]: Freescale Semiconductor Application Note. Document Number: AN4248. Rev. 4.0. 11/2015. http://www.nxp.com/files/sensors/doc/app_note/AN4248.pdf (дата обращения: 26.11.2015).
8. Чернышов Е. С., Шундеев Е. Н. О применении понятия «разность фаз» для гармонических сигналов разной частоты // *Информационные технологии XXI века: сб. науч. тр. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та*, 2015. С. 253—256.
9. Чернышов Е. С., Отческий С. А. Микроэлектромеханические системы отслеживания перемещений // *Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности: сб. науч. тр. по материалам Междунар. научн.-практ. конф. Тамбов: Изд-во ТРОО "Бизнес — Наука — Общество"*, 2013. Ч. 8. С. 147—148.

Дата принятия: 13.01.2016.