

Особенности создания поля позиционирования для локальной навигации в закрытых пространствах

М. В. ЖЕЛАМСКИЙ

С.-Петербургский государственный политехнический университет,
С.-Петербург, Россия, e-mail: zhelamsk@rambler.ru

Рассмотрены вопросы создания локального магнитного поля, используемого для позиционирования подвижного приемника по шести координатам на расстояниях до нескольких метров. По результатам исследования предложен путь решения задачи indoor-навигации в закрытых пространствах, исключающих применение систем GPS/ГЛОНАСС.

Ключевые слова: позиционирование, координаты, indoor-навигация.

The problems of a local magnetic field creation used for positioning of a mobile receiver along six coordinates at ranges up to several meters have been considered. By the study results the way of solution of the problem of indoor-navigation in closed areas, where the application of GPS/GLONASS system is impossible is suggested.

Key words: positioning, coordinates, indoor-navigation.

Известна технология активного магнитного позиционирования, предполагающая создание в источнике с помощью ортогональных обмоток синусоидальных, либо импульсных магнитных полей, измеряемых отдельно подвижным приемником, содержащим до трех ортогональных датчиков [1, 2]. Координаты приемника в системе координат источника определяют из решения системы нелинейных уравнений (СНУ), связывающих результаты измерений со свойствами источника и с положением и ориентацией приемника.

Автором предложен ADC-метод организации поля позиционирования (ПП) [3], являющийся дальнейшим развитием и продолжением методов, описанных в [1, 2], и основанный на питании ортогональных обмоток источника поля биполярными импульсами тока, что определяет меньшую подверженность результатов влиянию изменяющейся проекции магнитного поля Земли, позволяет увеличить частоту вычисления координат и дальность позиционирования.

Системы активного магнитного позиционирования (САМП) возникли и практически применяются с 70-х гг. XX в. Наиболее перспективными направлениями их применения являются медицина, биомеханика, направленное бурение, указание места расположения цели (целеуказание), системы визуализации виртуальной и смешанной реальности (т. е. совокупности наблюдения видимого мира и наложенного на него синтезированного изображения). Основные характеристики наиболее известных систем описаны в [4].

Отечественная теория и результативная практика активного магнитного позиционирования отсутствовали до недавнего времени по всем направлениям. Первые результаты в области целеуказания описаны в [5, 6]. В настоящей работе рассмотрены особенности создания ПП, существенные для измерений свободных движений человека, в частности, в актуальной задаче indoor-навигации [7].

Теоретический базис. Зададим вектор индукции локального магнитного поля в фиксированной системе координат

XYZ через матрицу, содержащую проекции вектора на оси координат в произвольной точке наблюдения:

$$\mathbf{B}_0(x, y, z) = [B_x, B_y, B_z]^T. \quad (1)$$

Известны аналитические выражения, описывающие осевые компоненты вектора индукции, создаваемой прямоугольной рамкой [8]. В [4] предложена форма аналитических выражений, позволяющая моделировать востребованный ниже источник ПП, содержащий произвольное число прямолинейных проводников с током, имеющих различную ориентацию в пределах общего замкнутого контура. Для прямоугольной обмотки, ориентированной по оси Z, имеем:

$$\left. \begin{aligned} B_{ZZ} &= \mu \mu_0 I_3 \left(\frac{E_4(E_2/F_4 + E_1/F_1)}{z_m^2 + E_4^2} + \frac{E_2(E_3/F_4 + E_4/F_2)}{z_m^2 + E_2^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{E_3(E_1/F_3 + E_2/F_4)}{z_m^2 + E_3^2} + \frac{E_1(E_3/F_3 + E_4/F_1)}{z_m^2 + E_1^2} \right); \\ B_{YZ} &= \mu \mu_0 I_z \left(\frac{z_m(E_3/F_4 + E_4/F_2)}{z_m^2 + E_2^2} + \frac{z_m(E_3/F_3 + E_4/F_1)}{z_m^2 + E_1^2} \right); \\ B_{YZ} &= \mu \mu_0 I_z \left(\frac{z_m(E_3/F_4 + E_4/F_2)}{z_m^2 + E_2^2} + \frac{z_m(E_3/F_3 + E_4/F_1)}{z_m^2 + E_1^2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где B_{XZ} , B_{YZ} , B_{ZZ} — значения осевых компонент вектора индукции поля, создаваемого в точке наблюдения обмоткой Z;

$$E_1 = E + y_m; E_2 = E - y_m; E_3 = F - x_m; E_4 = F + x_m; F_1 = \sqrt{z_m^2 + E_1^2 + E_4^2};$$

$$F_2 = \sqrt{z_m^2 + E_2^2 + E_4^2}; F_3 = \sqrt{z_m^2 + E_1^2 + E_3^2}; F_4 = \sqrt{z_m^2 + E_2^2 + E_3^2},$$

E, F — половины горизонтальной и вертикальной сторон обмотки Z по осям Y и X, соответственно; I_z — полный ток через

обмотку; z_m — высота точки наблюдения над обмоткой; μ — относительная магнитная проницаемость среды, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — абсолютная магнитная проницаемость.

Текущую ориентацию нормали к рабочей поверхности подвижного датчика магнитного поля относительно осей той же системы координат опишем с помощью матрицы S_R значений направляющих косинусов:

$$S_R = [\cos x_R, \cos y_R, \cos z_R]^T, \quad (3)$$

где $\cos x_R$ — косинус угла между нормалью S и осью X декартовой системы координат; $\cos y_R, \cos z_R$ — соответственно косинусы углов между нормалью и осями Y, Z , причем

$$\sqrt{\cos^2 x_R + \cos^2 y_R + \cos^2 z_R} = 1. \quad (4)$$

Кроме того, $S_R = ELS_0$, где S_0 — начальная матрица направляющих косинусов датчика в подвижной системе координат $X'Y'Z'$, получаемая априори в процессе его изготовления, а EL — матрица поворота подвижной системы координат датчика $X'Y'Z'$ относительно фиксированной системы источника локального поля XYZ на текущие значения углов поворота α, β, γ , которая при заданной последовательности поворотов $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ имеет следующий вид:

$$EL(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ M_4 & M_5 & M_6 \\ M_7 & M_8 & M_9 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $M_1 = \cos\beta\cos\alpha$, $M_2 = -(\cos\gamma\sin\alpha - \sin\gamma\sin\beta\cos\alpha)$, $M_3 = (\sin\gamma\sin\alpha + \cos\gamma\sin\beta\cos\alpha)$, $M_4 = \cos\beta\sin\alpha$, $M_5 = (\cos\gamma\cos\alpha + \sin\gamma\sin\beta\sin\alpha)$, $M_6 = -(\sin\gamma\cos\alpha - \cos\gamma\sin\beta\sin\alpha)$, $M_7 = -\sin\beta$, $M_8 = \sin\gamma\cos\beta$, $M_9 = \cos\gamma\cos\beta$.

В результате индукция поля B_R , подлежащая измерению рассматриваемым датчиком под воздействием вектора B_0 , определяется следующей формулой:

$$B_R = B_0^T S_R = \begin{bmatrix} B_x & B_y & B_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos x_R \\ \cos y_R \\ \cos z_R \end{bmatrix} = B_x \cos x_R + B_y \cos y_R + B_z \cos z_R. \quad (6)$$

На основе (5) можно составить СЧУ, каждое уравнение которой содержит в правой части независимый результат измерения локального поля подвижным датчиком, а в левой — значения индукции, которые вычислены для предполагаемых координат датчика:

$$B_x \cos x_R + B_y \cos y_R + B_z \cos z_R = B_i \quad (7)$$

Осевые компоненты вектора индукции включают искоемые линейные координаты точки наблюдения, а текущие значения направляющих косинусов — углы ориентации. Количество уравнений должно быть не меньше числа искоемых координат подвижного приемника. Задача позиционирования подвижного объекта в математическом смысле сводится к решению полученной системы относительно координат подвижного приемника в системе координат источни-

ка локального поля. Решение СЧУ может быть найдено итерационными методами, с использованием начального приближения координат вблизи предполагаемого нахождения подвижного объекта.

Рассмотрим подвижный приемник, содержащий триаду взаимно ортогональных датчиков, позволяющих вычислять модуль вектора индукции локального поля

$$B_m = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}, \quad (8)$$

не зависящего от ориентации приемника. Для набора необходимого числа независимых результатов с целью вычисления шести координат требуется по меньшей мере два локальных поля, раздельно действующих на датчики приемника. При существовании трех полей появляется возможность разделить переменные, и независимо и последовательно решить две разные СЧУ относительно линейных и угловых координат.

Источник поля позиционирования для indoor-навигации.

Из [1, 2] следует, что источник ПП, чаще всего, представляет три ортогональных обмотки с общим центром, намотанных на ферромагнитном сердечнике, увеличивающем индукцию внешнего поля. Размер источника, как правило, меньше расстояния до точки наблюдения, которое чаще всего не превышает 3 м. Оценки показывают, что в задачах целеуказания при мощности 100 Вт и магнитном моменте $50 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ измеряемая величина индукции находится на уровне $B_m \geq 10^{-5}$ Тл на расстоянии $L \leq 1$ м от источника ПП. Для увеличения расстояния до 3 м принято пропорционально увеличивать размер источника, сохраняя потребляемую мощность.

Однако расширение зоны позиционирования наиболее актуально для измерений свободных движений человека, которые не всегда могут укладываться в объем сферы радиусом 3 м, например, в задаче indoor-навигации. Типичной является задача позиционирования пользователя в аэропортах, торговых центрах, деловых зданиях, закрытых от прямого использования спутниковой навигации. Из [7, 9] следует, что разрабатываемые мировым сообществом альтернативные технологии измерений свободных движений человека в задаче indoor-навигации рассматриваются в сравнении с GPS/ГЛОНАСС-навигацией, где предпринимаются наиболее интенсивные попытки решения данной проблемы. Поэтому будем исследовать только линейное позиционирование с погрешностью не больше $\pm(0,2-0,3)$ м и частотой обновления координат на уровне 1 Гц, поскольку такие параметры недостижимы для GPS/ГЛОНАСС в закрытых пространствах на современном этапе.

На базе нового ADC-метода организации ПП для позиционирования свободных движений человека в задаче indoor-навигации предложено распределить в пространстве три обмотки И1-И3 источника магнитного поля позиционирования, как показано на рис. 1, где П1 — подвижный приемник [4, 10].

Преградами ПР1, ПР2 могут являться стены помещений. В этом случае аргументы аналитических выражений, описывающих поле позиционирования, определяются выражениями $x = x_m - x_i$, $y = y_m - y_i$, $z = z_m - z_i$, где x_i, y_i, z_i — координаты центра i -й обмотки распределенного источника в общей системе координат XYZ (см. рис. 1). На такой расчетной модели проведено численное исследование влияния взаимной

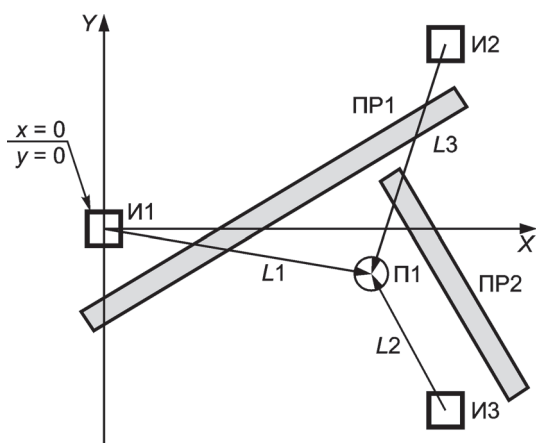


Рис. 1. Структура элемента распределенного источника магнитного поля позиционирования

ориентации обмоток, которое показало работоспособность системы как при совпадающих, так и при разных ориентациях. Полученный результат означает, что пространственное разнесение независимых источников поля не менее эффективно для достижения устойчивого решения математической задачи позиционирования, чем ортогональная ориентация обмоток в едином источнике.

На основе полученных результатов моделирования предложено наращивать размеры зоны позиционирования пу-

тем использования регулярной структуры распределенного источника, как показано на рис. 2. В соответствии с новым методом организации ПП источник работает в 4-тактном режиме, последовательно питая биполярными импульсами тока обмотки, входящие в каждую из четырех групп, обозначенных на рисунке цифрами 1—4. Элементы распределенного источника установлены в единой системе координат XOY в узлах сетки с регулярным шагом S по обеим осям на плоскости XOY. Сетка состоит из продольных X и поперечных Y линий с обмотками. Пользователь П с подвижным приемником может находиться в любом квадрате сетки, где будет окружен четырьмя ближайшими источниками, расположенными в узлах и работающими последовательно. Первыми включается группа источников 1, затем 2, далее 3, и, наконец 4. Таким образом, подвижный приемник, находясь в любом квадрате, воспримет последовательно двухполярные импульсы магнитного поля от четырех обмоток распределенного источника поля. Результаты моделирования движения в ПП распределенного источника приведены на рис. 3, а, б в виде зависимостей модулей векторов индукции, создаваемых обмотками, входящими в одну группу, от удаления точки наблюдения.

На рис. 4 в логарифмическом масштабе ($LM = \lg(B_m/10^{-7})$) показан профиль ПП во время первого такта работы фрагмента распределенного источника, который содержит 3×3 обмоток одной группы (см. рис. 2, квадраты с серым фоном). При шаге сетки $S = 3$ м такой распределенный источник покрывает зону позиционирования площадью 144 м^2 , обеспечивая свободное перемещение пользователя с под-

вижным приемником, например, в пределах спортивного зала. Показано, что при точности позиционирования в задаче indoor-навигации на уровне $\pm 0,1$ м можно учитывать поля только ближайших к подвижному приемнику обмоток.

Численное моделирование позиционирования в распределенном источнике. Ограничимся в данной работе линейным позиционированием для задачи indoor-навигации с распределенным источником.

Создана численная модель вычисления координат объекта, движущегося в ПП, создаваемом фрагментом 4-тактного распределенного источника (см. рис. 2, квадраты с полужирным контуром). Все шесть распределенных обмоток расположены в одной плоскости XOY при $z = 0$ с вертикальным направлением магнитных моментов. Расстояние между обмотками $S = 3$ м. Движение организовывалось параллельно оси X с шагом $0,05$ м между измерениями индукции поля позиционирования, создаваемого обмотками, как показано на рис. 2 пунктирной линией.

Линейные координаты подвижного объекта x, y, z определяли из решения СНУ, записанной в виде шести уравнений, описывающих модули векторов индукции на подвижном приемнике, создаваемых каждой из распределенных обмоток:

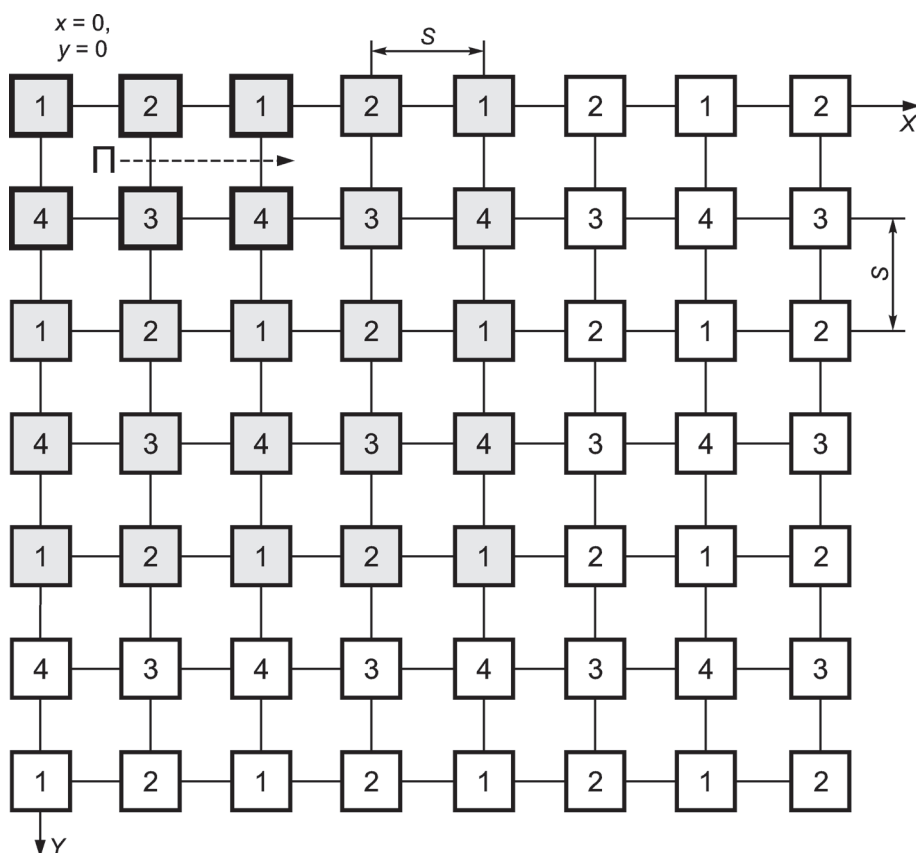


Рис. 2. Распределенный источник поля позиционирования; 1—4 — группы источников; П — пользователь

$$\left. \begin{aligned} B_{m1c} &= \sqrt{B_{x_1}^2 + B_{y_1}^2 + B_{z_1}^2}; \\ B_{m2c} &= \sqrt{B_{x_2}^2 + B_{y_2}^2 + B_{z_2}^2}; \\ &\dots \\ B_{m6c} &= \sqrt{B_{x_6}^2 + B_{y_6}^2 + B_{z_6}^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где B_{m1c} – B_{m6c} — расчетные значения модулей векторов магнитной индукции, создаваемых шестью обмотками источника, соответственно, полученные в точке начального приближения координат с использованием аналитического описания

ПП (2); B_{x_1} , B_{y_1} , B_{z_1} — измеренные подвижным приемником значения ортогональных проекций вектора индукции поля от обмотки X на оси подвижной системы координат. Обозначим выбранные шесть обмоток дополнительными номерами от 1 до 6 по часовой стрелке, начиная от начала координат. Тогда индексы 2–6 будут относиться к соответствующим обмоткам распределенного источника.

Функционал CF, подлежащий минимизации и составленный из невязок шести модулей векторов индукции, запишем следующим образом:

$$CF = (B_{m1m} - B_{m1c})^2 + (B_{m2m} - B_{m2c})^2 + (B_{m3m} - B_{m3c})^2 + \\ + (B_{m4m} - B_{m4c})^2 + (B_{m5m} - B_{m5c})^2 + (B_{m6m} - B_{m6c})^2.$$

Здесь индексы 2–6 относятся к соответствующим обмоткам распределенного источника. Решение СЧУ (9) найдем методом градиентного спуска. Итерационная формула в данном случае примет следующий вид:

$$|xyz|_{k+1}^T = |xyz|_k^T - \text{step1} \text{grad}[CF],$$

где $|xyz|_{k+1}^T$ — транспонированная матрица текущих линейных координат; $|xyz|_k^T$ — начальное приближение координат; $\text{grad}[CF] = [\partial CF/\partial x, \partial CF/\partial y, \partial CF/\partial z]^T$ — транспонированная матрица пространственных производных функционала в точке начального приближения; step1 — шаг итерационного процесса, выбором значения которого обеспечивается скорость сходимости.

Результаты вычисления координат приведены на рис. 3, а, и показано линейное нарастание вычисляемого удаления x за пределы одного периода структуры распределенного источника из четырех обмоток (1–2, 5–6) при сохранении постоянных смещения y и высоты z.

На рис. 3, б приведены значения модулей векторов индукции B_m , измеряемые подвижным приемником от распределенных обмоток во время движения по траектории $x = 1 + 0,05i$. Взаимное удаление обмоток S и их магнитные моменты $I \times S$ выбраны так, что вычислительная модель обес-

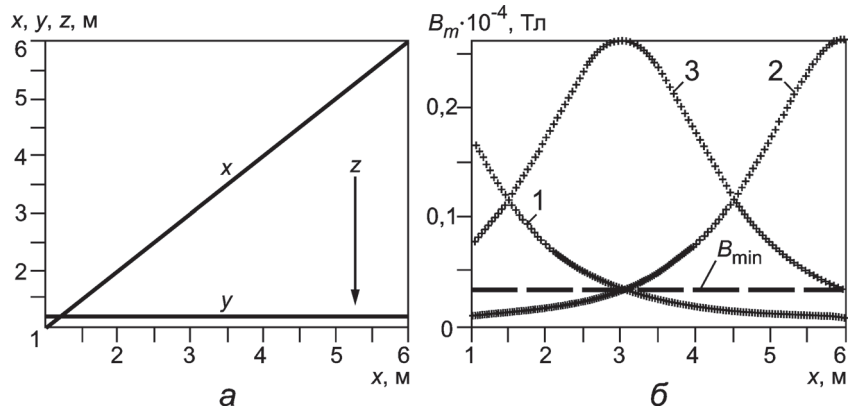


Рис. 3. Вычисленные значения линейных координат x , y , z во время движения приемника по траектории (а) и значения модулей векторов индукции B_m вдоль траектории (б): 1 — обмотки 1–6; 2 — обмотки 3–4; 3 — обмотки 2–5

печивает успешное сопровождение объекта, движущегося через периодические элементы распределенного источника. При удалении $x = 3$ м индукция от обмоток 1, 6 уменьшается ниже уровня $B_{\min}$, обозначенного на рис. 3, б пунктирной линией, которая обеспечивает требуемую точность позиционирования. В то же время возрастает индукция от обмоток 3, 4, что позволяет продолжать движение приемника по выбранной траектории с заданной точностью позиционирования.

Предложена формула, связывающая расстояние S между обмотками в распределенном источнике с магнитным моментом обмотки M и минимальной индукцией $B_{\min}$, необходимой для обеспечения требуемой точности и частоты позиционирования:

$$S = 0,013 \sqrt{M / (10B_{\min})}.$$

Для сопровождения объекта, движущегося через периодическую структуру распределенного источника, предложена скользящая математическая модель, в которой учитываются поля только тех обмоток, чьи линейные координаты ближе всех к текущим значениям вычисляемых координат

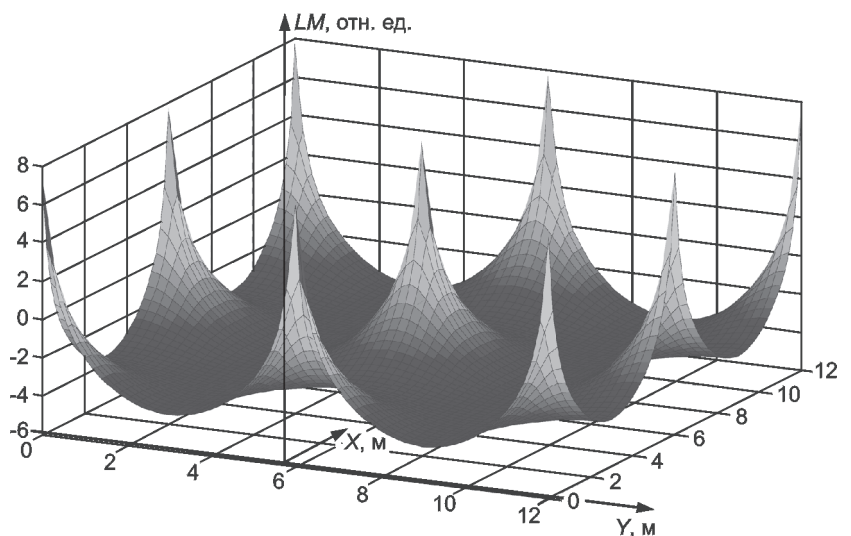


Рис. 4. Поле позиционирования распределенного источника

подвижного приемника. Такая модель позволяет увеличить скорость вычисления, исключив расчет поля от обмоток, не влияющего на поле в точке наблюдения из-за удаленности.

Пути метрологического обеспечения САМП с распределенным источником поля позиционирования. Известны основные элементы неопределенности ПП такие, как нерегулярность укладки витков в обмотках, погрешность определения длин сторон обмоток, конечность поперечного сечения обмотки.

В распределенном источнике целесообразно применять плоские обмотки без сердечника минимальных размеров, которые можно располагать в элементах интерьера помещения. Показано, что при достаточно малых размерах сечения обмотки ab по сравнению с площадью обмотки AB ($AB > 1000ab$) можно рассчитывать на достаточную точность воспроизведения индукции, соответствующую аналитическим выражениям (2), на дальностях, превышающих характерный размер обмотки.

Можно предположить существование магнитного интерьера в зоне позиционирования. В этом случае для повышения точности описания ПП может быть использован предложенный комбинированный алгоритм, в котором (7), входящее в решаемые системы, принимает вид

$$(B_x + \Delta B_x)\cos x + (B_y + \Delta B_y)\cos y + (B_z + \Delta B_z) = B_{m1},$$

где B_x, B_y, B_z — осевые компоненты вектора индукции, определяемые из математической модели (2); $\Delta B_x, \Delta B_y, \Delta B_z$ — поправки, найденные из индивидуальной карты, полученной в процессе картографирования поля.

Для картографирования поля в зоне позиционирования может быть применена апробированная схема, где подвижный приемник перемещается по плоскости подвижного стола, выполняя векторные измерения в узлах трехмерной сетки. Для обработки результатов измерений предложен алгоритм получения карты поправок, учитывающий неортогональность и разнесение датчиков в приемнике, нестабильность питания.

Подвижным приемником может быть трехмерный феррозонд, например, описанный в работе [8]. На расстояниях больше 1 м и при обозначенной точности позиционирования 0,1 м размер датчика уже не имеет такого большого значения как в задаче целеуказания [6, 7] и может составлять порядка 10 мм.

Можно предположить существование ограничений на форму и размеры обмоток, возникающих при адаптации распределенного источника к интерьеру закрытого помещения.

В этом случае, как указано выше, предложенная форма записи аналитических выражений (2), описывающих ПП, позволяет синтезировать любую форму обмотки.

Например, для обмотки треугольной формы, в которой катеты образованы двумя смежными прямолинейными отрезками прямоугольной рамки, а диагональ проходит через центр гипотетической прямоугольной рамки, можно записать следующие выражения для осевых компонент вектора индукции в точке наблюдения.

Компоненты вектора индукции от двух катетов найдем из (2), устранив вклады отсутствующих сторон прямоугольной рамки:

$$\left. \begin{aligned} B_{ZZ} &= \mu\mu_0 I_3 \left(\frac{E_4(E_2/F_2 + E_1/F_1)}{z_m^2 + E_4^2} + \frac{E_1(E_3/F_3 + E_4/F_1)}{z_m^2 + E_1^2} \right); \\ B_{YZ} &= \mu\mu_0 I_z \left(\frac{z_m(E_3/F_3 + E_4/F_1)}{z_m^2 + E_1^2} \right); \\ B_{XZ} &= \mu\mu_0 I_z \left(\frac{z_m(E_1/F_1 + E_2/F_2)}{z_m^2 + E_4^2} \right). \end{aligned} \right\}$$

Компоненты вектора от диагонали треугольной обмотки получим следующим образом:

вычислим координаты точки наблюдения для гипотенузы, виртуально повернутой до совпадения с осью Y :

$$[x'y'z']^T = EZ[x_my_mz_m]^T,$$

где

$$EZ = \begin{vmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} -$$

матрица поворота гипотенузы вокруг оси Z на угол $\alpha = -\arctg(F/E)$; в «новой» точке наблюдения, используя (2) вычислим компоненты B_x, B_z с учетом, что длина гипотенузы

$$2G = 2\sqrt{E^2 + F^2}:$$

$$B_Z = \mu\mu_0 I_z \left(\frac{E_4(E_2/F_2 + E_1/F_1)}{z'^2 + E_4^2} \right), B_X = \mu\mu_0 I_z \left(\frac{z_m(E_1/F_2 + E_2/F_2)}{z_m^2 + E_4^2} \right).$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь } E_1 &= G + y'; E_2 = G - y'; E_3 = -x'; E_4 = x'; F_1 = F_3 = \\ &= \sqrt{z'^2 + E_1^2 + E_4^2}; F_2 = F_4 = \sqrt{z'^2 + E_2^2 + E_4^2}; \end{aligned}$$

повернем найденные компоненты B_x, B_z на угол $-\alpha$ в исходную точку наблюдения:

$$B_{xd} = EZB_x, B_{yd} = EZB_y;$$

получим осевые компоненты суммарного вектора индукции в точке наблюдения от треугольной рамки, суммируя соответствующие компоненты:

$$B_X = B_{XZ} + B_{xd}; B_Y = B_{YZ} + B_{yd}; B_Z = B_{ZZ} + B_{zd}.$$

Аналогичным образом можно вычислить компоненты вектора индукции, создаваемого обмоткой любой формы, составленной из прямолинейных проводников с током.

Выводы. Проведено исследование активного магнитного позиционирования в части создания ПП в задаче измерений свободных перемещений человека. Предложен путь решения актуальной задачи indoor-навигации на базе распределенного источника ПП. Получены оценки размеров источника, измеряемых сигналов и вычисляемых координат. На базе полученных результатов могут быть развернуты дальнейшие теоретические и практические работы по созданию отечественной технологии активного магнитного позиционирования подвижных объектов на малых и средних дальностях, свободной от заимствований зарубежных решений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-08-00559).

Литература

1. **Pat.** No 4054881 US. Remote object position locator. Raab F.H. 1977.
2. **Pat.** No 4849692 US. Device for quantitatively measuring the relative position and orientation of two bodies in the presence of metals utilizing direct current magnetic fields. Blood E., 1989.
3. **Пат. 2413957 РФ.** Способ определения линейного положения и ориентации подвижного объекта / М. В. Желамский // Бюл. Изобрет. № 7.
4. **Желамский М. В.** Электромагнитное позиционирование подвижных объектов. М.: Физматлит, 2013 г.
5. **Желамский М. В.** Первая отечественная система магнитного позиционирования в полном объеме технических требований // Датчики и системы. 2009 г. № 1. С. 2—7.
6. **Желамский М. В.** Первый отечественный магнитный трекер для целеуказания // Датчики и системы. 2011. № 1. С. 9—15.

7. **Curran K. e. a.** An Evaluation of Indoor Location Determination Technologies // J. of Location Based Services. 2011. V. 5. N. 2. P. 61—78.

8. **Афанасьев Ю.В. и др.** Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979.

9. **Золотов Е.** Плюсы и минусы indoor-навигации. [Электрон. ресурс] <http://ibusiness.ru/blogs/14424> (дата обращения 06.06.2014)

10. **Желамский М. В.** Глобальная система виртуальной и дополненной реальности для закрытых пространств // Датчики и системы. 2009. № 7. С. 33—37.

Дата принятия 04.04.2014 г.

621.317.33

Методы повышения точности измерений параметров емкостных датчиков

В. С. МЕЛЕНТЬЕВ

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия,
e-mail: vs_mel@mail.ru

Рассмотрены методы раздельного определения параметров емкостных датчиков по мгновенным значениям переходных процессов в измерительной цепи, которые обеспечивают повышение точности измерений в результате использования многоэлементной схемы замещения датчика.

Ключевые слова: емкостной датчик, переходный процесс, мгновенные значения, сопротивление проводника и изоляции.

The methods of separate determination of capacitive transducers parameters by instant values of transient processes in measuring circuit are considered. Methods provide an increase of measurement accuracy due to taking into account a multielement equivalent circuit of the sensor.

Key words: capacitive transducer, transient process, instant values, resistance of conductors, resistance of isolation.

В настоящее время для измерений параметров емкостных датчиков (ЕД) достаточно широко используют методы, в которых информативные параметры вычисляют по мгновенным значениям переходного процесса в измерительной цепи (ИЦ). Реализация данных методов обеспечивает сокращение времени измерения.

При измерениях часто требуется определить не только информативные, но и паразитные (неинформативные) параметры. Применение многоэлементной схемы замещения ЕД, построенной на основе априорной информации об объекте исследования, повышает точность определения информативных параметров [1].

Известные методы и средства измерений параметров ЕД по мгновенным значениям переходного процесса не учитывают, в частности, сопротивление соединительных проводников, с помощью которых датчик подключают к ИЦ. Также неинформативным элементом ЕД является эквивалентное сопротивление, обусловленное потерями в изолирующем диэлектрике и сквозными токами утечки. Все это приводит к

отклонению реального переходного процесса от предполагаемой модели, что неизбежно вызывает дополнительную погрешность определения информативного параметра датчика.

Методы раздельного определения параметров емкостных датчиков.

1. **Метод определения емкости датчика и сопротивления соединительных проводников.** В [2] предложен метод для исключения погрешности измерения емкости датчика, обусловленной конечными значениями сопротивлений соединительных проводников. Он заключается в том, что на ИЦ, состоящую из последовательно включенных первого и второго образцовых резисторов сопротивлением R_0 , ЕД емкостью C_d и соединительных проводников сопротивлениями R_1 , R_2 , подают напряжение постоянного тока U_0 . Одновременно через образцовый интервал времени Δt измеряют мгновенные значения напряжений U_{11} на участке цепи, содержащем второй образцовый резистор и ЕД, и U_{21} — на емкостном датчике относительно общего вывода ИЦ.