

Особенности измерения локального магнитного поля позиционирования на малых дальностях

М. В. ЖЕЛАМСКИЙ

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

Описаны элементы бесконтактной системы определения линейных и угловых координат подвижного объекта с помощью измерений компонент локального магнитного поля от неподвижного источника. Предложена система нелинейных уравнений, связывающих результаты измерений с взаимным расположением и ориентацией источника магнитного поля и малого подвижного приемника. Описан подход к решению системы уравнений.

Ключевые слова: локальное магнитное поле, позиционирование, подвижный приемник, вычисление координат.

The elements of noncontact system of measuring the linear and angle coordinates built on creation of local magnetic field by the source, and on measurement of its components by a small mobile sensor — have been described. The equation system connecting the coordinates of the source and receiver with the results of magnetic measurements has been solved.

Key words: local magnetic field, positioning, mobile receiver, coordinates calculation.

В настоящее время стало актуальным создание отечественной технологии активного магнитного позиционирования, исключаящей заимствование зарубежных решений. Использование локального магнитного поля для позиционирования пары источник—приемник с целью определения их взаимного положения в пространстве развивалось в США с 1950-х гг. и к концу XX в. приобрело вид технологии магнитного позиционирования на малых расстояниях по шести координатам — трем линейным и трем углам Эйлера [1]. Для этого создают независимые поля, которые раздельно регистрируют подвижным приемником с несколькими датчиками. Для определения шести координат источник поля должен содержать три независимых обмотки, а подвижный приемник — до трех взаимно ортогональных индукционных датчиков. Полученный с датчиков набор данных используется для пересчета параметров источника поля в координаты подвижного объекта путем периодического решения соответствующих систем нелинейных уравнений (СНУ) [1]. В состав системы активного магнитного позиционирования (САМП) входит фиксированный источник поля позиционирования (ПП), малый подвижный приемник и вычислитель, управляющий источником ПП и решающий измерительную и математическую задачи активного позиционирования.

В настоящей работе представлены особенности создания на удаленном подвижном объекте трехмерного приемника ПП, построенного на основе датчиков Холла для малой дальности (не более 1 м).

Описание измеряемого поля. Источник ПП, содержащий ортогональные дипольные обмотки с совмещенными центрами, создает последовательность импульсных полей чередующейся ориентации. На рис. 1 показана последовательность биполярных импульсных токов питания обмоток, использованная в способе организации ПП, предложенном в [2]. Общая длительность единичного импульса составляет ~3 мс, включая плоскую часть длительностью ~2 мс, предназна-

ченную для измерений. Этот метод менее подвержен влиянию изменяющейся проекции магнитного поля Земли (МПЗ), чем описанный в [1], что позволяет значительно увеличить частоту вычисления координат, дальность позиционирования и уменьшить транспортное запаздывание.

Для оценки индукции, создаваемой единичной обмоткой в зоне позиционирования, применены следующие упрощенные выражения [3]:

$$B_r = \mu_0 I [a^2/(2R^3)] \cos \theta; \quad B_\theta = \mu_0 I [a^2/(4R^3)] \sin \theta,$$

где B_r , B_θ — радиальная и меридиональная компоненты вектора индукции в полярных координатах; I — ток питания обмотки; R — удаление приемника от центра витка; θ — угол от оси витка до точки наблюдения; a — радиус обмотки, $a \ll R$.

Для обмотки с магнитным моментом на уровне $IA = 50 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ (здесь A — полная площадь всех витков обмотки) показано, что максимальное и минимальное значения модуля векто-

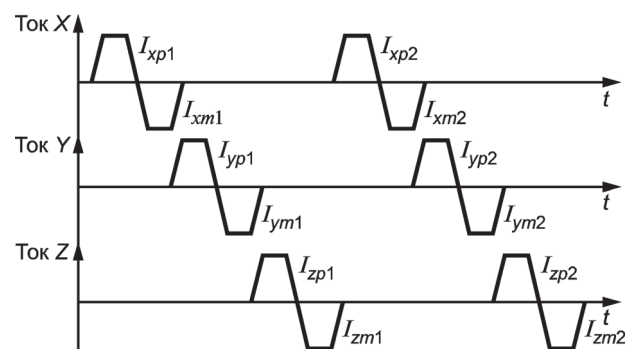


Рис. 1. Последовательность парных импульсов тока через ортогональные обмотки источника магнитного поля позиционирования, реализованная в новом методе разделения полей

ра индукции на внутренней (удаление 0,1 м от центра обмотки) и внешней (удаление 1 м) границах зоны позиционирования составляют $4 \cdot 10^{-4}$ и 10^{-5} Тл, соответственно. Градиент модуля вблизи внутренней границы достигает значения 10 % на миллиметр.

Таким образом, в задачу магнитного позиционирования входит измерение слабого импульсного неоднородного магнитного поля в условиях воздействия индуктивных помех при минимальных размерах и массе удаленного подвижного приемника.

Требования к датчикам.

Полоса пропускания. Импульсный характер ПП отличает САМП от известных схем магнитометров стационарных полей, включая геофизические [4]. Магнитометр САМП должен без искажений передавать в вычислитель форму импульсного сигнала с датчика Холла, сохраняя постоянной составляющую индукции поля, поэтому в измерительном канале магнитометра необходимо использовать фильтр низких частот, согласованный с формой импульсного сигнала. Тогда погрешность от частотных помех проявится в искажении фронтов импульса, а форма вершины импульса не изменится.

Известно выражение, связывающее частоту среза фильтра низких частот (ФНЧ) Δf и длительность нарастания сигнала на выходе фильтра Δt при скачкообразном входном воздействии [5]:

$$\Delta f \geq (0,611 - 1)/\Delta t.$$

Зарубежные производители САМП рассчитывают частоту среза ФНЧ f_h исходя из частоты переключения ортогональных полей f_s [6]: $f_h \approx 5f_s$. Приняв $\Delta t = 500$ мкс, $f_s = 400$ Гц, из обоих критериев получим необходимое значение полосы пропускания измерительного канала магнитометра САМП на уровне $\Delta f \approx 2$ кГц.

Чувствительность. Приняв найденное выше значение индукции поля на внешней границе зоны позиционирования на уровне 10^{-5} Тл за минимум, сравним его со средним квадратическим отклонением (СКО) шумов современных инструментальных усилителей, поднимающих уровень сигнала с датчиков до уровня, приемлемого для аналого-цифрового преобразования (АЦП). При спектральной плотности шума усилителя на уровне $S \approx 7 \dots 9$ нВ/Гц^{1/2} и выбранной частоте среза полосы пропускания измерительного канала на уровне 2 кГц, СКО теплового шума инструментального усилителя измерительного канала в соответствии с формулой Найквиста [5] составит:

$$U = S(\Delta f)^{1/2} \approx 9 \cdot 2000^{1/2} = 440 \text{ нВ}.$$

Задав чувствительность датчика на уровне 1 В/Тл, получим нижнюю оценку отношения сигнал—шум на внешней границе зоны позиционирования без усреднения на уровне ≥ 25 .

Размер датчика. Каждый датчик измеряет среднеинтегральную индукцию по площади чувствительной зоны [7], поэтому в градиентном поле возникает погрешность измерения индукции ПП, связанная со смещением среднего по площади датчика значения индукции по отношению к геометрическому центру датчика. Исследования показали, что для обеспечения смещения среднего поля от центра датчика на величину не более, чем $\delta x = 1$ мм, необходимо уменьшать поперечный размер и чувствительного элемента датчика по

мере приближения к источнику поля [1]. В частности, показано, что в системе целеуказания с дальностью до 1 м, использующей поля ортогональных диполей с магнитным моментом $\sim 50 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, размер датчика не должен превышать 0,5 мм. Для САМП с дальностью действия более 1 м размер датчика менее существенен и может составлять единицы миллиметра [7, 8].

Автором предложено выражение для оценки относительной аддитивной составляющей систематической погрешности измерения индукции магнитного ПП ε_{s1} , связанной с конечным размером датчика:

$$\varepsilon_{s1} = \Delta x_s \xi / B_m,$$

где Δx_s — размер датчика; $\xi = (\partial B / \partial x)_{\max} - (\partial B / \partial x)_{\min}$ — максимальная неоднородность пространственной производной проекции вектора индукции по размеру датчика; B_m — текущее значение модуля индукции в точке наблюдения.

Случайные погрешности измерений поля позиционирования. Степень влияния случайных погрешностей магнитных измерений на погрешность вычисления координат подвижного приемника исследована методом Монте—Карло на примере математической модели, описывающей решение СНУ относительно линейных координат с помощью следующей итерационной формулы:

$$|xyz|_k = |xyz|_{k-1} - J(xyz_k)^{-1} D(xyz_k),$$

где $|xyz|_k$ — матрица искоемых координат; $|xyz|_{k-1}$ — начальное приближение; $D(xyz_k)$ — столбец невязок полей, определяющих текущую разность между измеренными значениями в правых частях СНУ и вычисленными для предполагаемых координат; $J(xyz_k)^{-1}$ — обратная матрица Якоби производных модулей индукции полей каждой из ортогональных обмоток B_x , B_y , B_z по направлениям осей неподвижной системы координат источника, взятых в точке начального приближения координат.

К результатам измерений индукции разными датчиками добавлены некоррелированные центрированные сигналы от генератора случайных чисел, моделирующие собственные шумы и внешние помехи подвижного приемника. При объеме выборки $N = 200$ в каждом следующем эксперименте дисперсия случайных чисел σ_B линейно повышалась, по результатам вычислений определяли СКО σ_x координат. Максимальное значение СКО случайного процесса на входе $\sigma_{x \max}$, приводящее к срыву вычислительного процесса, принимали за параметр устойчивости к случайным погрешностям измерений.

Установлена пропорциональная зависимость между погрешностями вычисления и измерений. Показано, что при выбранных параметрах системы параметр трансформации $T = (\sigma_{x0} / \sigma_{B0})(B/X)$ относительной погрешности измерения индукции к относительной погрешности вычисления координат близок к единице в центре зоны и увеличивается по мере удаления.

Систематические погрешности измерений поля позиционирования. Трансформация систематических погрешностей вычисления координат исследована методом прямых вычислений для мультипликативных и аддитивных составляющих на входе СНУ. Показано усиление влияния аддитивных составляющих погрешности измерений при удалении приемника от источника. Трансформация мультипликативной погрешности измерений слабее зависит от удаления.

Трансформация погрешностей измерений в задаче ориентации больше, чем при линейном позиционировании, но менее зависит от удаления.

Помехозащищенность. В диапазон индукции импульсных полей с амплитудами, превышающими разрешающую способность магнитных измерений в САМП (>20 нТл), попадают внешние промышленные магнитные помехи (50 Гц и гармоники), генерируемые воздушными или кабельными линиями электропередачи (ЛЭП), энергоемким оборудованием (>1 мкТл), а также радиочастотное поле от радиовещательных станций и телецентров. Изменением МПЗ (амплитудой до 0,6 нТл в диапазоне частот 0,1—30 Гц) и атмосферными шумами (на уровне единиц пикотесла) в применении к САМП в задачах указания места расположения цели (целеуказания) пренебрегаем.

Состояние вопроса. Для измерений характеристик ПП подвижным приемником САМП проанализированы разные типы датчиков, сравнительные параметры которых приведены в табл. 1. Все рассмотренные датчики удовлетворяют требованиям по ширине полосы пропускания. Зарубежные производители [9, 10] предлагают трехкомпонентные индукционные датчики с совмещенными центрами, диаметром обмоток 3—4 мм и площадью обмоток 1000 мм².

Сравнительные параметры датчиков для САМП

Параметр датчика	Тип преобразователя			
	Феррозонд	Магниторезисторы	Индукционный	Датчики Холла
Полоса пропускания, кГц, более	1	1	1	1
Разрешающая способность, нТл	20	150	<1	~100
Площадь для помех, мм ²	1000	10	1000	1
Характерный размер, мм	3—5	<3	3—4	<1

Оценки показывают, что для таких датчиков погрешность смещения достигает единиц миллиметров вблизи источника поля. Индукционный датчик с площадью обмотки до 1000 мм² обладает повышенной чувствительностью к индуктивным электромагнитным помехам.

Отмеченные особенности зарубежных приемников ПП требуют дальнейшего уменьшения размеров датчиков. Однако их производителями уже достигнут минимум габаритных размеров феррозонда трехкомпонентной конфигурации (3—4 мм), а уменьшение площади обмотки датчика из соображений помехозащищенности неизменно приведет к потере им чувствительности к полезному сигналу.

В результате сравнительного анализа выбраны датчики Холла, обладающие беспрецедентно малыми размерами чувствительной зоны, максимальной помехозащищенностью, более высокой перспективой термостабилизации по сравнению с магниторезистивными датчиками.

В результате численного моделирования сделаны оценки достижимых параметров первичного измерительного преобразователя вектора индукции ПП на основе датчиков

Холла, подлежащих реализации в макетном образце ближнего действия (табл. 2).

Таблица 2
Достижимые параметры датчиков Холла для САМП

Параметр датчика	Достижимое значение
Диапазон измеряемой магнитной индукции, Тл	$\pm 20 \cdot 10^{-4}$
Размер чувствительной зоны, мм, менее	0,1
Чувствительность датчика, В/Тл	$1 \pm 0,1$
СКО выходного сигнала совместно с усилителем, нТл, менее	100
ТК смещения, мкВ/°С, менее	15
ТК чувствительности, %/°С, менее	0,005
Геометрические размеры первичного преобразователя, мкм	$100 \times 100 \times 10$
Габаритные размеры 3D измерительного преобразователя в сборе, мм	$7 \times 7 \times 12$

Для дальнейшего повышения точности измерений и помехозащищенности датчиков автором предложено: уменьшать размеры каждого из трех однокомпонентных ортогональных датчиков; разнести однокомпонентные датчики в ортогональной ориентации в пределах подвижного приемника; вносить поправки на экстраполяцию результатов измерений к общему центру.

Для расположения датчиков, в соответствии с рис. 2, предложена следующая поправка экстраполяции для каждого датчика:

$$\Delta B_{1E} = (B_{xc} - B_{xd}) \cos \alpha_R + (B_{yc} - B_{yd}) \cos \beta_R + (B_{zc} - B_{zd}) \cos \gamma_R, \quad (1)$$

где B_{xd} , B_{yd} , B_{zd} — осевые компоненты вектора индукции, взятые из математической модели поля для координат начального приближения [1, 14], отражающих реальное положение датчика; B_{xc} , B_{yc} , B_{zc} — компоненты вектора индукции центра подвижной системы координат $X'Y'Z'$; $\cos \alpha_R$, $\cos \beta_R$, $\cos \gamma_R$ — текущие значения направляющих косинусов нормали к плоскости датчика в системе координат источника поля.

С учетом того, что линейное разнесение датчиков может достигать 6 мм, установлены, исследованы и описаны источники погрешности измерений индукции компактного ПП (табл. 3).

Для уменьшения погрешностей от нестабильности питания САМП измерения тока через датчики и амплитуды импульсного тока через обмотки источника проводятся в реальном времени. Ориентация каж-

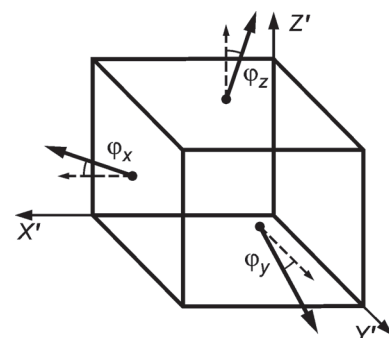


Рис. 2. Взаимное расположение и ориентация датчиков в системе координат подвижного приемника

Таблица 3

Оценки погрешностей измерения поле позиционирования датчиками Холла

Источник погрешности	Оценка погрешности, %
Неопределенность чувствительности	$\pm 0,5$
Конечный размер датчика	± 1
Шумы	$\pm 0,44$
Влияние магнитного поля Земли	$\pm 0,05$
Влияние температуры	$\pm 0,1$
Пространственное разнесение датчиков	$\pm 0,1$
Неортогональность датчиков	$\pm 0,5$
Нестабильность питания	$\pm 0,05$
Погрешность АЦП	$\pm 0,03$

дого датчика в пределах подвижного приемника учитывается с помощью предварительно полученной матрицы направляющих косинусов нормалей к рабочим поверхностям датчиков $S_0 = [\cos \varphi, \cos v, \cos \xi]^T$, где $\cos \varphi$ — значение косинуса угла между нормалью и осью X' декартовой системы координат подвижного приемника; $\cos v, \cos \xi$ — значения косинусов углов между нормалью и осями Y' и Z' , соответственно. При этом выполняется условие:

$\sqrt{\cos^2 \varphi + \cos^2 v + \cos^2 \xi} = 1$. Влияние температуры снижено активной термостабилизацией трехкомпонентного измерительного преобразователя.

В результате относительную инструментальную погрешность на датчиках Холла можно оценить как

$$|\Delta_{\text{инстр}} / B| 100\% \leq 1,5 + 2(|B_{\text{max}} / B| - 1).$$

По результатам исследований предложен состав измерительного преобразователя повышенной точности измерения ПП на разнесенных датчиках малых размеров с учетом выявленных источников погрешностей.

Математическая модель подвижного приемника поля позиционирования.

Для учета описанных выше особенностей измерения ПП разработан алгоритм преобразования поступающей с датчиков информации в значения ортогональных компонент и модулей векторов индукции ПП (рис. 3). Алгоритм реализован в программно-математическом обеспечении макетного образца системы позиционирования дальностью до 1 м [11, 12]. Измеряют пять сигналов: три на выходе датчиков Холла, общий ток питания датчиков Холла, ток питания источника ПП. Частота сбора информации 250 кГц. Исходный массив данных, полученных из памяти АЦП, содержит 1250 чисел, полученных по пяти каналам за длительность одного биполярного импульса ПП. Массив разделен на пять субмассивов по 250 чисел, описывающих каждый из измеряемых сигналов. В каждом субмассиве формируется информационная часть данных, отражающая результаты, полученные на плоских частях импульсов поля, исключая переходные процессы. Полученные 10 последовательностей данных по 100 чисел в каждой подвергаются цифровой обработке: ФНЧ, устраняющим высокочастотные составляющие; медианным фильтром, устраняющим грубые ошибки; фильтром скользящего среднего (ФСС), сглаживающим полученный сигнал, для которого вычисляются значения математического ожидания и СКО. Парные значения сигналов с датчиков Холла, полученные из первых трех субмассивов, вычитают друг из друга для компенсации влияния МПЗ, дрейфа датчиков, усилителей, смещения АЦП и магнитной помехи частотой 50 Гц. Разностные сигналы подвергают процедуре приведения к общему центру подвижного приемника. Затем они

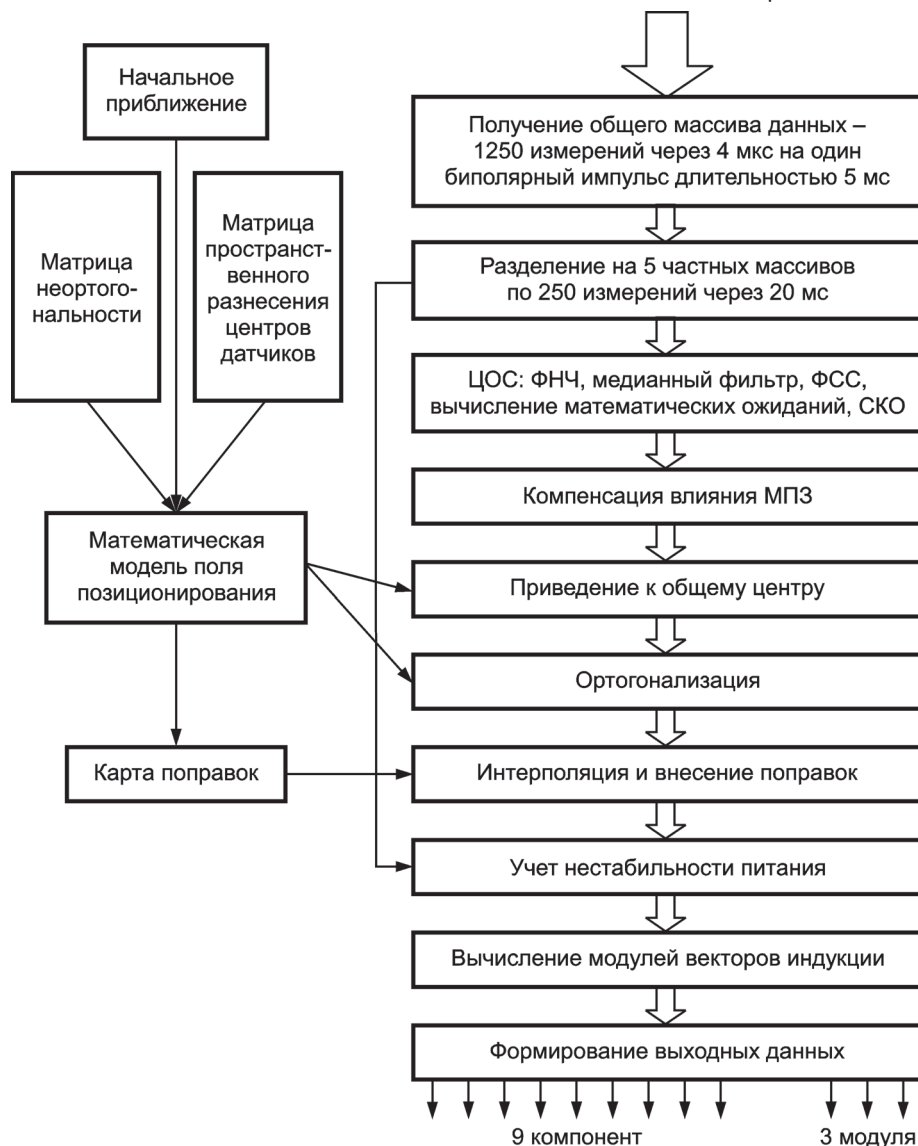


Рис. 3. Структура измерительного алгоритма:

ЦОС — цифровая обработка сигнала; ФНЧ — фильтр низких частот; ФСС — фильтр скользящего среднего; СКО — среднее квадратическое отклонение

проходят процедуру ортогонализации в процессе решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} B_x \cos \varphi_{1R} + B_x \cos \nu_{1R} + B_x \cos \xi_{1R} = B_1; \\ B_x \cos \varphi_{2R} + B_x \cos \nu_{2R} + B_x \cos \xi_{2R} = B_2; \\ B_x \cos \varphi_{3R} + B_x \cos \nu_{3R} + B_x \cos \xi_{3R} = B_3, \end{cases}$$

где B_1, B_2, B_3 — индукции полей, измеряемые неортогональными датчиками; $\cos \varphi_{iR}, \cos \nu_{iR}, \cos \xi_{iR}$ ($i = 1, 2, 3$) — значения направляющих косинусов трёх датчиков в неподвижной системе координат, вычисленных на предыдущем шаге итерационного процесса. К полученным значениям ортогональных компонент магнитного поля добавляются поправки на погрешность описания ПП, полученные из априорной карты с учетом необходимой интерполяции из узловых значений, к текущим координатам точки наблюдения. Данные, содержащиеся в оставшихся двух субмассивах, используются для внесения поправок на нестабильность тока питания датчиков и источника поля. Из ортогональных компонент вектора индукции, приведенных к общему центру подвижного приемника, с учетом поправок вычисляют значения модулей векторов индукции ПП. Полученные данные формируются в выходной массив данных, содержащий девять ортогональных компонент в точке наблюдения и три значения модуля, необходимых для решения СЧУ позиционирования [14].

Описанный выше алгоритм реализован в двух вариантах: в среде MatLab с целью численного моделирования свойств подвижного приемника для различных приложений и в среде C++ в качестве программы, работающей в режиме реального времени в составе САМП.

Описание изготовленного образца. Для задачи целеуказания создан трехкомпонентный преобразователь на базе датчиков Холла [1, 11, 12], обладающий следующими особенностями конструкции и схемотехники.

Варьированием толщины и площади токовой пластины датчика найдено оптимальное соотношение между чувствительностью датчика и собственными шумами $U_{ш}$.

Для уменьшения амплитуды конвекционных колебаний температуры над поверхностью датчика и колебаний гальваномагнитных ЭДС каждый датчик установлен на тонкой подложке из материала с высокой теплопроводностью и закрыт плотной термоизоляцией (рис. 4).

Три ортогональных датчика Холла на отдельных корпусах собраны на термостабилизированной немагнитной платформе вместе с аналоговой аппаратурой в составе подвижного приемника [1, 11—13]. Температура платформы стабилизирована с погрешностью не больше $\delta T = \pm 0,5$ °C, а ток питания датчика определен с погрешностью не более 0,01 %. Температура стабилизации датчиков +70 °C, что превышает максимальную температуру рабочего диапазона.

Защитный корпус выполняет роль электростатического экрана. Объем подвижного приемника в сборе составляет 27 см³, масса 35 г. Энергопотребление устройства составляет 2,8 Вт, а перегрев наружной поверхности подвижного приемника — 15 °C при комнатной температуре окружающей среды.

Начальная калибровка образцового датчика в указанном составе проводится в стационарном поле катушек Гельмгольца или в МПЗ.

Показано, что известные геомагнитные методы калибровки не пригодны для САМП, так как описанный подвижный приемник ПП не предназначен для измерения стационарного поля.

Сигнальный кабель позволяет удалить подвижный приемник от стационарной вычислительной системы на расстояние до 10 м. Результаты исследования подвижного приемника описаны в работах [11, 12].

Выводы. Намечен путь к достижению предельной точности позиционирования подвижных объектов по шести координатам на малых дальностях через минимизацию выявленных источников погрешностей измерений. Разработан подвижный приемник поля позиционирования, удовлетворяющий требованиям, сформулированным к САМП дальностью действия до 1 м. Показано, что на больших дальностях позиционирования могут быть успешно применены стандартные феррозонды, пассивные индукционные датчики.

Наиболее перспективные области применения данной технологии — инвазивная медицина, целеуказание, измерение свободных движений человека, управление подвижными объектами [13].

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

Л и т е р а т у р а

1. Желамский М. В. Электромагнитное позиционирование подвижных объектов. М: Физматлит, 2013.
2. Пат. № 2413957 РФ. Способ определения линейного положения и ориентации подвижного объекта / Желамский М. В. // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 7.
3. Калантаров П. Л., Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники Л.-М.: Госэнергоиздат, 1951.
4. Афанасьев Ю. В. Феррозонды. Л.: Энергия, 1969.
5. Зернов Н. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей. Л.: Энергия, 1972.
6. Пат. N. 5600330 US. Device for measuring position and orientation using non-dipole magnet DC fields / E. B. Blood. Ascension. 1997.
7. Афанасьев Ю. В. и др. Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979.
8. Пат. N. 3800213 US. Three axis toroidal fluxgate type magnetic sensor / Rorden L. H. Develco, Inc. 1974.
9. Пат. N. 4287809 US. Helmet-mounted sighting system / Egli W. H. e. a. 1981.
10. Пат. N. 6754596 US. Method of measuring position and orientation with improved signal to noise ratio / Westley A. Ascension. 2004.
11. Желамский М. В. Первая отечественная система магнитного позиционирования в полном объеме технических требований // Датчики и системы. 2009 г. № 1. С. 2—7.
12. Желамский М. В. Первый отечественный магнитный трекер для целеуказания // Датчики и системы. 2011. № 1. С. 9—15.
13. Желамский М. В. Магнитный датчик положения и ориентации с шестью степенями свободы для управления подвижными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 6. С. 75—78.
14. Желамский М. В. Особенности создания поля позиционирования для локальной навигации в закрытых пространствах // Измерительная техника. 2014. № 7. С. 40—45.

Дата принятия 04.06.2014 г.

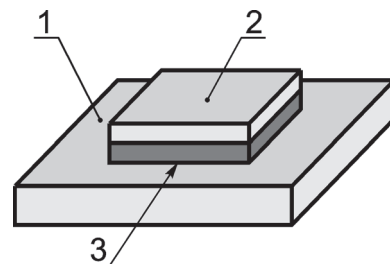


Рис. 4. Схема измерительного преобразователя и подвижного приемника: 1 — корпус; 2 — диэлектрическая подложка; 3 — чувствительный элемент