

Г. В. АНЦЕВ, В. В. АВЕРКИЕВ, В. А. МОГИЛЕВКИН, И. А. ЧЕРНЯЕВ

ОБНАРУЖЕНИЕ ДИПОЛЬНОГО СИГНАЛА НА ФОНЕ ПОМЕХ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ НОСИТЕЛЯ МАГНИТОМЕТРА

В статье рассматривается алгоритм обнаружения дипольного сигнала на фоне помех при произвольном движении носителя магнитометра. Построенная математическая модель диполя в виде разложения в ряд из шести базисных функций позволяет с одного факта обнаружения диполя произвести как обнаружение, так и оценку местоположения источника. Приведены результаты полунатурного моделирования.

Ключевые слова: дипольный источник, разложение в ряд базисных функций, произвольное движение носителя магнитометра, оценка координат источника.

Введение

В настоящее время интенсивно развиваются средства автономной навигации авиационных и морских носителей. Широко применяемые инерциальные навигационные системы (ИНС) удовлетворяют большинству предъявляемых к ним требований, исключение составляет длительность автономной навигации.

Повышения точности автономной навигации можно добиться путем корректировки ИНС с помощью системы, в которой задействуются дополнительные источники информации о положении объекта, такие как спутниковая навигационная система (СНС).

Идея использования для этой цели магнитного поля Земли (МПЗ) появилась достаточно давно [1, 2, 3, 4]. Принципиальная работоспособность системы навигации с коррекцией ИНС по МПЗ была подтверждена экспериментально [12, 13, 14, 15, 16]. Перспективность применения измерений геомагнитного поля как дополнительного источника навигационной информации обусловлена глобальностью, стабильностью и помехозащищенностью МПЗ. Системы коррекции ИНС по МПЗ особенно востребованы при полете над морем или во время плавания, в том числе под водой, когда использование других дополнительных средств автономного позиционирования может оказаться недоступным (навигация по оптическому контрасту, рельефу земной поверхности и т.п.).

Наибольшей информативностью в задаче определения местоположения носителя обладает аномальное МПЗ (АМПЗ), поскольку в отличие от главного (ГМПЗ) оно содержит высокочастотные в пространственном отношении составляющие.

Анцев Георгий Владимирович. Доктор технических наук, генеральный директор, АО «НПП «Радар ммс» (С.-Петербург).

Аверкиев Владимир Витальевич. Заслуженный машиностроитель России, директор, НПК МАКС АО «НПП «Радар ммс».

Могилевкин Владимир Абрамович. Главный специалист, НПК МАКС АО «НПП «Радар ммс».

Черняев Иван Анатольевич. Кандидат физико-математических наук, начальник отдела, НПК МАКС АО «НПП «Радар ммс».

Для осуществления геомагнитной навигации необходимо выделить элементы АМПЗ, для которых существуют карты. Помимо этого, нужны измерители, устанавливаемые на подвижных носителях. К элементам АМПЗ относятся:

- модуль АМПЗ;
- вектор АМПЗ;
- градиент модуля АМПЗ.

Модуль АМПЗ является очевидным первым кандидатом для использования в силу наличия карт модуля и квантовых магнитометров (КМ), обеспечивающих максимально возможную на данный момент точность измерений АМПЗ. Достаточно проработаны методы компенсации магнитных помех носителя (МПН), что важно для размещения КМ на борту носителя.

В последнее время появились глобальные карты модуля поля отдельных участков Земли [9, 18, 19, 20], с помощью которых потенциально можно выполнять непрерывную коррекцию ИНС. Точность навигации при использовании величины модуля поля ограничивают вариации МПЗ. При этом само АМПЗ нестабильно и, хотя и относительно медленно, меняется с течением времени [10], что требует периодического обновления существующих карт.

Потенциально более высокую точность навигации можно получить, если задействовать в качестве информативного параметра вектор АМПЗ. Создание такой системы возможно благодаря глобальной пространственной цифровой модели компонент АМПЗ, разработанной в ИЗМИРАН [21, 22, 23], которая позволяет получать карты вектора поля из его величины для заданного географического района. К минусам надо отнести необходимость определения ориентации носителя с высокой точностью для вычисления компонент МПЗ в инерциальном пространстве и то, что погрешность имеющихся векторных преобразователей как минимум на порядок больше, чем модульных.

Применительно к объектам,двигающимся по воде, целым рядом преимуществ обладает система навигации с коррекцией по градиенту модуля АМПЗ. В частности, она устойчива к вариациям МПЗ, а градиент АМПЗ более стабилен во времени по сравнению с величиной поля. Трудность создания такой системы, как и при использовании в качестве информативного параметра вектора поля, состоит в необходимости высокоточного определения ориентации носителя (в данном случае для получения градиента МПЗ в инерциальном пространстве). Дополнительную сложность представляет собой размещение нескольких магнитометров на носителе.

В настоящей работе рассматривается система коррекции ИНС путем обнаружения характерных дипольных источников АМПЗ в виде дипольных аномалий небольшой протяженности. Определение координат полученных источников и сравнение их с картой позволяет точно скорректировать погрешности ИНС.

В состав системы входит ИНС, КМ высокой чувствительности, дополненный трехкомпонентным магнитометром (ТКМ) для компенсации МПН, и цифровая карта аномалий МПЗ. Набор координат объекта на интервале его движения, вырабатываемый ИНС, с помощью цифровой карты преобразуется в аномалии МПЗ, которые сравниваются с набором обнаруженных аномалий КМ, очищенных от помех.

Модель полезного сигнала диполя

Различные физические тела искусственного или естественного происхождения, обладающие магнитным моментом, могут быть описаны моделью магнитного дипо-

ля или совокупностью диполей. В системе координат (СК), связанной с движением носителя магнитометра по прямолинейной траектории, магнитное поле диполя может быть представлено в виде

$$\Delta T_c(\mathbf{r}(t)) \approx \frac{\mu_0}{4\pi R(t)^5} \cdot \mathbf{b}^T \cdot \begin{bmatrix} 3r_x^2(t) - R^2(t) & 3r_x(t)r_y & 3r_x(t)r_z \\ 3r_y r_x(t) & 3r_y^2 - R^2(t) & 3r_y r_z \\ 3r_z r_x(t) & 3r_z r_y & 3r_z^2 - R^2(t) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{M}, \quad (1)$$

где \mathbf{M} – вектор магнитного момента диполя в принятой СК; \mathbf{b} – орт МПЗ в принятой СК; r_x – положение магнитометра на маршруте движения изделия относительно диполя; r_y, r_z – боковое и вертикальное смещения магнитометра относительно диполя соответственно; $R(t) = \sqrt{r_x^2(t) + r_y^2 + r_z^2}$ – текущее расстояние до диполя.

Данные тела на фоне ГМПЗ являются «яркими» отметками, привязанными к координатам. Такие отметки, обнаруженные бортовым магнитометром, на эталонной карте МПЗ могут служить опорными точками для коррекции ИНС.

Традиционный алгоритм выявления дипольного сигнала на фоне помех, применяемый в современных магнитных обнаружителях, основан на представлении сигнала диполя в виде разложения в ортонормированный ряд, состоящий из трех базисных функций [6]. Эти функции зависят от величины траверсного расстояния до диполя и скорости движения носителя. Разложение справедливо для прямолинейного движения носителя относительно источника сигнала. С учетом этого система обработки становится многоканальной по траверсному расстоянию относительно одной координаты – движения вдоль маршрута.

Накопленный опыт применения магнитометров, размещенных на авиационных носителях, показывает, что такое ограничение крайне неудобно по следующим причинам:

- алгоритм обнаружения диполя при одиночном контакте не может определить координаты источника, поскольку неизвестно, справа или слева от траектории движения тот находится;
- увеличивается время принятия решения, так как носитель должен прямолинейно пролететь расстояние после траверса, равное двум-трем дальностям, на которые настроен канал обработки;
- отклонение траектории от прямолинейной по той или иной причине приводит к росту помехи, связанной с наличием градиента МПЗ.

С целью устранения перечисленных недостатков авторы выполнили обобщенное разложение сигнала диполя в ряд по базисным функциям произвольного движения носителя в горизонтальной плоскости. На основе разложения разработан алгоритм, предназначенный для обнаружения аномалии, – двухкоординатный обнаружитель, позволяющий при одиночном контакте определить координаты обнаруженного диполя, сравнить их с картой МПЗ и откорректировать погрешности ИНС.

Универсальный алгоритм обнаружения сигнала диполя

Модель сигнала диполя может быть представлена следующим образом. Вектор магнитной индукции (ВМИ) поля диполя $\mathbf{V}_d(t)$ добавляется к ВМИ МПЗ. При использовании модульного магнитометра сигналом является разность модулей векторов указанной суммы и магнитной индукции поля Земли. Ввиду крайней малости поля объекта по сравнению с МПЗ сигнал может быть записан в виде проекции

$$s(t) = \mathbf{b}^T \mathbf{B}_d(t), \tag{2}$$

где \mathbf{b} – орт вектора магнитной индукции МПЗ в принятой СК, \mathbf{b}^T – вектор-строка.

С учетом общего выражения для магнитного поля диполя (1) $s(t)$ приводится к виду

$$s(t) = \frac{\mu_0}{4\pi R^3(t)} \mathbf{b}^T [3\mathbf{R}(t)\mathbf{R}^T(t) - R^2(t)\mathbf{E}] \mathbf{M}, \tag{3}$$

в котором \mathbf{R} – радиус-вектор положения магнитометра относительно объекта в выбранной системе координат; \mathbf{M} – вектор магнитного момента объекта в этой системе; \mathbf{E} – единичная матрица.

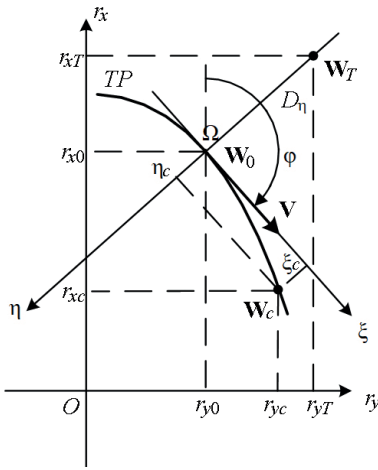


Рис. 1. Две прямоугольные СК: Oxy и $\Omega\xi\eta$

Для того чтобы конкретизировать модель сигнала в двумерной плоскости, необходимо определиться с рабочей СК.

Полагая, что носитель магнитометра движется на постоянной высоте – D_z константа, будем учитывать только направление горизонтальных осей. Рассмотрим СК с центром в фиксированной точке W_0 окна обнаружения и осью $\Omega\xi$, направленной по вектору скорости движения \mathbf{v} в этой точке (рис. 1).

Координаты произвольной точки W_c на траектории движения TP в СК $\Omega\xi\eta$ относительно местной навигационной СК Oxy (север–восток–вниз) выражаются соотношениями

$$\xi_c = (r_{xc} - r_{x_0}) \cos \varphi + (r_{yc} - r_{y_0}) \sin \varphi, \tag{4}$$

$$\eta_c = -(r_{xc} - r_{x_0}) \sin \varphi + (r_{yc} - r_{y_0}) \cos \varphi,$$

φ – путевой угол.

СК $\Omega\xi\eta$ будем называть скоростной. Она меняет направление своих горизонтальных осей с изменением направления вектора горизонтальной скорости, что характерно для криволинейной траектории движения.

Когда ось $\Omega\xi$ направлена по путевому углу в точке W_0 , то последняя является точкой траверса, в которую удобно поместить начало координат, то есть

$$\xi_c(t_0) = \eta_c(t_0) = 0. \tag{5}$$

Согласно рис. 1, в момент времени t_0 координаты цели ξ_T и η_T принимают следующие значения:

$$\xi_T(t_0) = 0, \eta_T(t_0) = -D_\eta. \tag{6}$$

Обозначим расстояние до цели по вертикали через D_z , тогда траверсное расстояние будет равно $D = \sqrt{D_\eta^2 + D_z^2}$.

Положим, что в отличие от скорости носителя магнитометра скоростью объекта допустимо пренебречь, тогда представим расстояние до диполя $R(t)$ в виде

$$R(t) = D \sqrt{1 + \frac{[\xi_c(t)]^2 + [\eta_c(t)]^2 - 2D_\eta \eta_c(t)}{D^2}}. \tag{7}$$

Расстояние до диполя параметрически зависит не только от времени, но и от момента, принятого за t_0 , – $R = R(t, t_0)$. Чтобы не загромождать дальнейшие соотношения, опустим явное указание зависимости R от t_0 .

С помощью нормированных переменных

$$\begin{aligned}d_{\eta} &= \frac{D_{\eta}}{D}, \\d_z &= \frac{D_z}{D}, \\ \bar{\xi}_c(t) &= \frac{1}{D} \xi_c(t), \\ \bar{\eta}_c(t) &= \frac{1}{D} \eta_c(t),\end{aligned}$$

запишем нормированное расстояние до диполя как

$$\bar{R}(t) = \frac{R(t)}{D} = \sqrt{1 + [\bar{\xi}_c(t)]^2 + [\bar{\eta}_c(t)]^2 - 2d_{\eta}\bar{\eta}_c(t)}. \quad (8)$$

Используя модель (3) и производя алгебраические преобразования, получим следующее искомое разложение сигнала объекта s для произвольной траектории движения носителя магнитометра в горизонтальной плоскости:

$$s(\bar{\xi}_c(t), \bar{\eta}_c(t), D, d_{\eta}) = \mu_0/4\pi D^3 \sum_{i=1}^6 \alpha_i \Psi_i(\bar{\xi}_c(t), \bar{\eta}_c(t), d_{\eta}). \quad (9)$$

Базисные функции сигнала Ψ_i имеют вид

$$\begin{aligned}\Psi_1(t) &= 1/\bar{R}^5(t), \\ \Psi_2(t) &= \bar{\xi}_c(t)/\bar{R}^5(t), \\ \Psi_3(t) &= \bar{\eta}_c(t)/\bar{R}^5(t), \\ \Psi_4(t) &= \bar{\xi}_c(t)\bar{\eta}_c(t)/\bar{R}^5(t), \\ \Psi_5(t) &= [\bar{\eta}_c(t)]^2/\bar{R}^5(t), \\ \Psi_6(t) &= [\bar{\xi}_c(t)]^2/\bar{R}^5(t),\end{aligned} \quad (10)$$

полностью определяемый движением носителя магнитометра относительно дипольного источника.

Важно отметить, что разложение (9) точное, то есть описывает дипольный сигнал без методической погрешности. В соответствии с этим представлением полезный сигнал определен с точностью до параметров местоположения диполя D , d_{η} в неизвестный момент времени t_0 и коэффициентов α_i . Можно показать, что коэффициенты разложения зависят от орта вектора магнитной индукции МПЗ \mathbf{b} и вектора магнитного момента диполя \mathbf{M} .

Количество независимых членов разложения (базисных функций) непостоянно и зависит от характера движения. Так, в случае прямолинейного движения боковая координата $\eta_c(t)$ обращается в ноль, в разложении (9) остаются только три базисные функции – $\Psi_1(t)$, $\Psi_2(t)$, $\Psi_6(t)$, в результате чего приходим к известному представлению

дипольного сигнала (1). При этом теряется информация о боковом положении диполя d_{η} , то есть при прямолинейном движении неизвестно, находится диполь справа или слева от носителя. Кроме того, при движении по окружности (движение с постоянной кривизной) независимы пять базисных функций – $\Psi_1(t)$, $\Psi_2(t)$, $\Psi_3(t)$, $\Psi_4(t)$, $\Psi_6(t)$.

Из того, что при криволинейном движении носителя линейно независимы как минимум пять базисных функций, следует, что могут быть найдены значения траверсных дальности D и бокового смещения D_{η} . Добавляя к этому положение носителя в момент траверса t_0 , получаем все три координаты положения диполя, что решает задачу его локализации за один проход одиночным магнитным обнаружителем. Явный вид базисных функций разложения сигнала позволяет для произвольно реализовавшегося горизонтального движения магнитометра определить линейно независимый базис и тем самым решить, возможна ли локализация диполя в каждом конкретном случае. Это отличает полученное в данной работе разложение от стандартного представления дипольного сигнала, в котором расстояние до диполя представлено в виде двумерной сетки [24].

Полученные координаты объекта подставляем в соотношения (3) и решаем линейную систему уравнений относительно компонентов M_x , M_y и M_z вектора \mathbf{M} , затем рассчитываем величину магнитного момента объекта поиска, то есть классифицируем его.

Поиск объекта происходит в условиях помех, обусловленных различными факторами. Это означает, что для работы обнаружителя требуются соответствующие их модели. При этом следует иметь в виду, что эти модели описывают составляющие помехи на скользящем интервале, то есть в окне обнаружения.

Поле объекта поиска наблюдается на фоне аномалий МПЗ, которые препятствуют обнаружению в той мере, в какой пересекаются их спектры. С одной стороны, мощность спектра профиля МПЗ значительно превышает мощность аномалии объекта (как правило, на несколько порядков). С другой стороны, она сосредоточена в области низких частот и скорость ее убывания тем больше, чем больше глубина залегания аномалий. Из этого следует, обнаружить дипольный источник можно только при том условии, если траверсное расстояние до него значительно меньше, чем до ближайших аномалий МПЗ. В этом случае спектр искомого объекта будет смещен относительно спектра МПЗ в область верхних частот.

Модель профиля МПЗ сформируем в скоростной СК (рис. 1). Для этого по координатам изделия \mathbf{r} в окне обнаружения $[t - \tau, t]$, которые мы примем известными, определяем значение путевого угла $\bar{\varphi}$ в точке предполагаемого траверса \mathbf{r}_0 . Далее, используя преобразование (6), вычисляем вектор перемещений в скоростной СК на интервале обнаружения.

В общем случае МПЗ в районе поиска нам неизвестно – мы можем только утверждать, что оно как потенциальное поле бесконечно дифференцируемо, поэтому его профиль в окне обнаружения $[t - \tau, t]$ опишем выражением

$$T(\xi_c(t), \eta_c(t), r_z(t)) \cong T(\xi_c(t)) + \frac{\partial T}{\partial \eta}(\xi_c(t))\eta_c(t) + \frac{\partial T}{\partial z}(\xi_c(t))\delta r_z(t), \quad (11)$$

основанным на градиенте поля. Такое представление позволяет учесть вертикальные отклонения реального движения от среднего r_{z_0} на интервале обнаружения:

$$\delta r_z(t) = r_z(t) - r_{z_0}.$$

Составляющие градиента

$$\frac{\partial T}{\partial \eta}, \frac{\partial T}{\partial z}$$

являются функциями продольного перемещения $\xi_c(t)$. Функции

$$T(\xi_c), \frac{\partial T}{\partial \eta}(\xi_c), \frac{\partial T}{\partial z}(\xi_c)$$

могут быть приближены полиномами различных степеней. Рациональный выбор значений степеней полиномов можно осуществить с привлечением априорной информации о глубине моря в районе или, что лучше, о МПЗ района поиска (например, по модели EMAG2 [10]).

Другим фактором, ограничивающим обнаружение, может быть погрешность компенсации помехи носителя. Это вызвано несколькими причинами. Во-первых, если исходная помеха велика, то погрешность компенсации, пропорциональная второму порядку малости вариации углов ориентации, оказывается также существенной. Во-вторых, модель помехи предполагает постоянство магнитных полей, создаваемых изделием, что может не выполняться, например, после ремонта или замены отдельных частей. Кроме того, существует нестационарная остаточная помеха, которая вызывается токами в электрических цепях изделия.

Чтобы отслеживать остаточную помеху носителя, применяется модель, функционально зависящая от ориентации изделия относительно МПЗ, которая измеряется приращениями компонент МПЗ $\mathbf{B}_x, \mathbf{B}_y$ относительно их среднего значения на интервале обнаружения. Модель остаточной помехи носителя не является обязательной в том смысле, что ее использование или неиспользование зависит от того, насколько соблюдены требования электромагнитной совместимости при размещении магнитометра на борту носителя.

В общем виде модель модуля поля T в окне обнаружения представляется как разложение

$$T(t, \xi_c, \eta_c, r_z, \mathbf{B}_x, \mathbf{B}_y) = \sum_{i=1}^M \beta_i \Phi_i(\xi_c, \eta_c, r_z, \mathbf{B}_x, \mathbf{B}_y) \quad (12)$$

с известными функциями, зависящими от положения носителя в скоростной СК (ξ_c, η_c, r_z) и компонент МПЗ $\mathbf{B}_x, \mathbf{B}_y$. Коэффициенты разложения β_i не определены.

Сформируем базисные функции помехи Φ_i и сигнала Ψ_i с помощью навигационных данных $\xi_c^*(t), \eta_c^*(t), r_z^*(t)$ и данных трехкомпонентного магнитометра $\mathbf{B}_x^*, \mathbf{B}_y^*$.

Модели (12) и (9) содержат неизвестные параметры, которые могут принимать множество значений. При построении решающих правил алгоритмов обработки одним из способов разрешения априорной неопределенности является подход, в соответствии с которым оцениваются неизвестные параметры для обеих гипотез, используемые в отношении правдоподобия так, как если бы они были истинными [10]. Задав двумерную сетку значений в координатах дальность – боковое отклонение $\{D_k, D_{\eta_l}\}$ и находя оценки линейно входящих параметров $\{\alpha_p, \beta_i\}$, получаем алгоритм обнаружения объекта, аналогичный описанному в [6, 7, 11]. Отличие состоит в том, что одномерные модели сигнала и помехи обобщаются на случай произвольного движения в горизонтальной плоскости.

Алгоритм обнаружения сигнала диполя

Моделирование алгоритма обнаружения при криволинейном движении проводилось на основе данных, полученных с помощью магнитометра ММС-27 во время реального полета на вертолете Ка-27М.

Структура алгоритма обнаружения представлена на рис. 2.

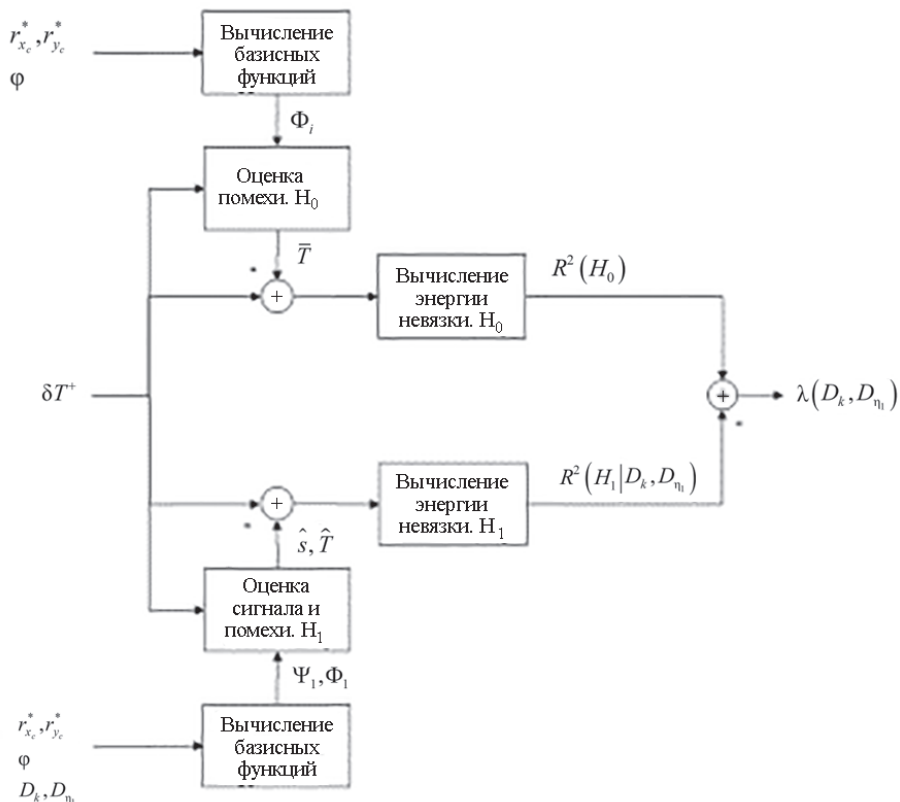


Рис. 2. Структурная схема алгоритма обнаружения

Поиск, базирующийся на совместной обработке магнитометрических и навигационных данных, ведется непрерывно вне зависимости от характера траектории полета, и обнаружение сигнала диполя происходит на любом участке, включая развороты.

Результаты полунатурного моделирования

На рис. 3 представлены результаты моделирования алгоритма обнаружения на прямолинейном маршруте (рис. 3, а) и непосредственно при развороте (рис. 3, б). Важно отметить, что учет реального движения вертолета позволяет ослабить обнаружение ложных целей, вызванных градиентом геомагнитного поля, на прямолинейных маршрутах. Улучшение отношения «сигнал–шум» при использовании двумерного описания сигнала также отмечается в [24], из чего возможность локализации диполя никак не следует.

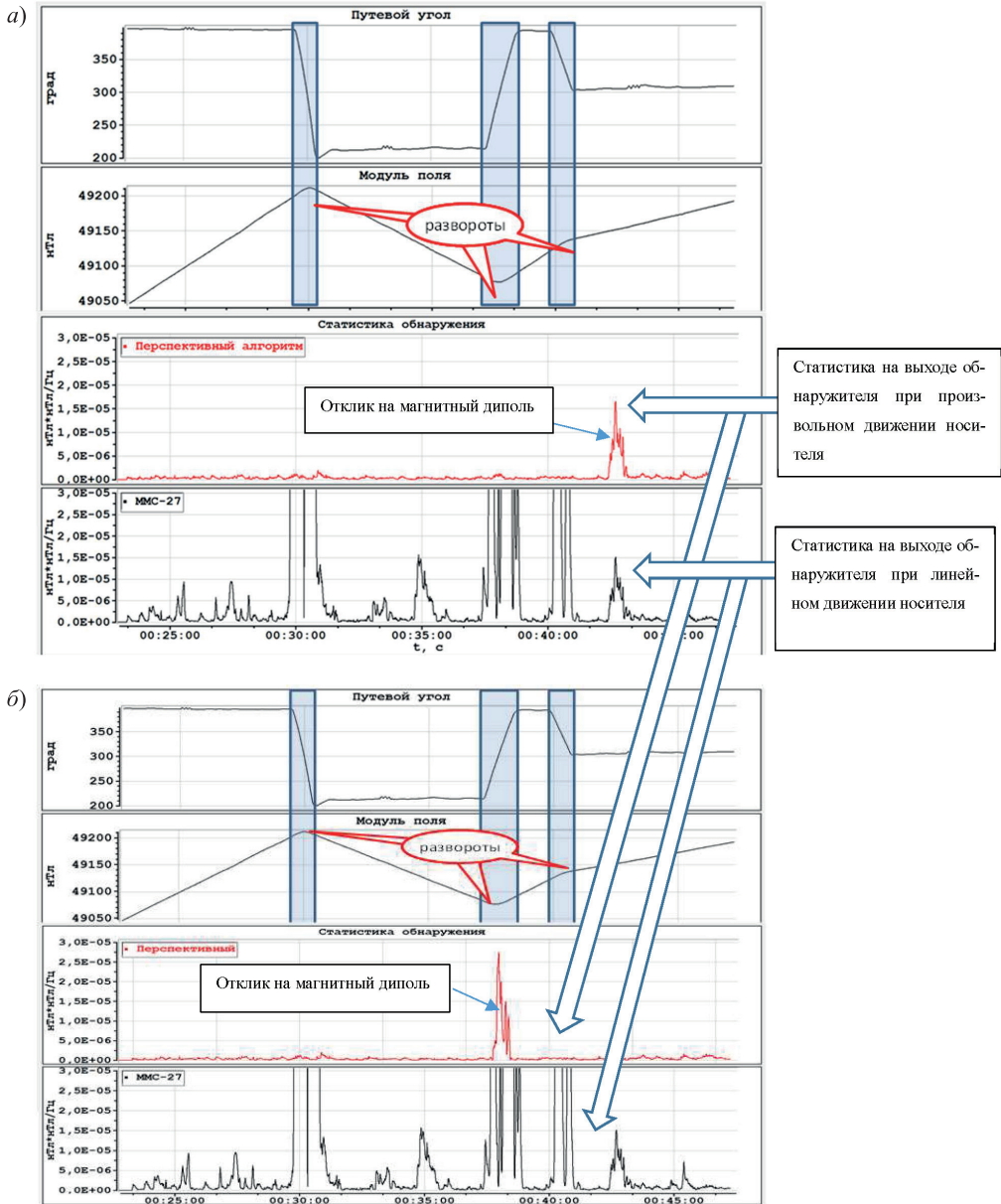


Рис. 3. Результаты моделирования алгоритма обнаружения сигнала диполя:
 а) на прямолинейном маршруте, б) непосредственно при развороте

На рис. 4 показан вид сигнала на выходе обнаружителя магнитометра. Данные получены магнитометром ММС-27С, размещенным на самолете-лаборатории Ил-114ЛЛ, при пролете над дамбой в Финском заливе.

В данном случае координаты определялись во время прохода между створками защитных ворот дамбы. Поскольку магнитное поле объекта (дамбы) представляет собой пространственную структуру, состоящую из множества диполей, магнитометр на высоте 300 м воспринимает совокупное поле. По сути, прибор обнаружил

магнитный центр объекта, который оказался на водной поверхности, что, по-видимому, обусловлено симметрией конструкции дамбы.

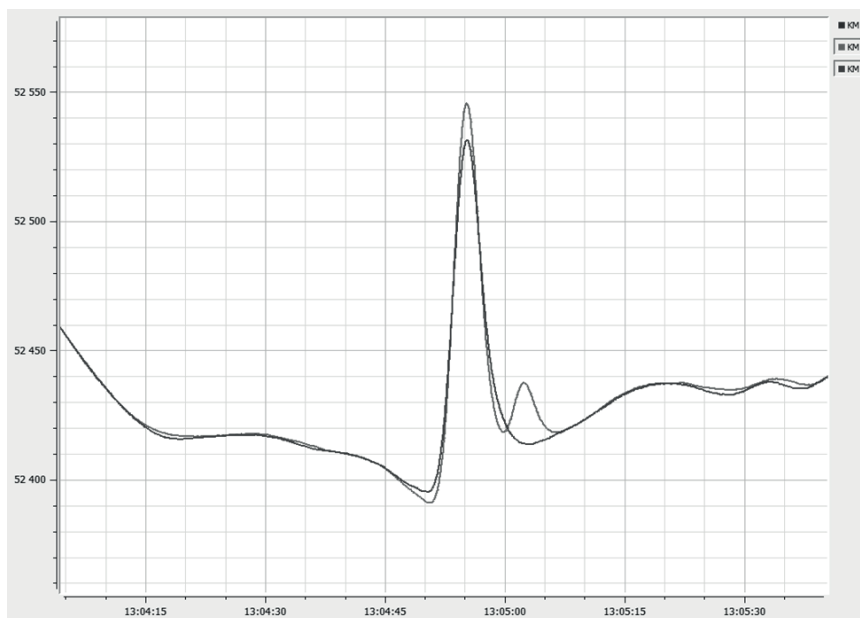


Рис. 4. Сигнал на выходе магнитометра.

Один график – первый пролет над дамбой, второй – в обратном направлении

Радиолокационная система (РЛС), установленная на этом же самолете, была использована как дополнительная система определения координат прохода дамбы. Данная РЛС определяет координаты прохода по радиолокационному изображению с разрешением 10 м. На рис. 5 показаны точки определения координат прохода, полученные с помощью радиолокатора и магнитометра.



Рис. 5. Траектория пролета над дамбой с отметками об обнаружении радиолокатором и магнитометром

Заключение

Представленная в статье математическая модель сигнала диполя при произвольном движении измерителя (магнитометра) позволяет построить оптимальный многоканальный пространственный обнаружитель, обеспечивающий не только снижение ложных тревог, обусловленных движением носителя в градиенте геомагнитного поля, но и оценивание координат положения диполя за один проход. Привязка полученных координат диполей к карте геомагнитного поля повысит помехозащищенность систем навигации при отсутствии данных от спутниковой навигационной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. М.: Наука, 1979.
2. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. М.: Наука, 1985. 328 с.
3. Джанджгава Г.И., Герасимов Г.И., Августов Л.И. Навигация и наведение по пространственным геофизическим полям // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. №3 (140). С. 74–84.
4. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/emag2.html>.
5. Каршаков Е.В. Применение измерений параметров градиента магнитного поля Земли в задаче навигации летательного аппарата // Управление большими системами. Выпуск 35.
6. Семеvский Р.Б., Аверкиев В.В., Яроцкий В.А. Специальная магнитометрия. СПб.: Наука, 2002. 228 с.
7. Аверкиев В.В., Петухов Ю.М. Оптимизация поиска локальных магнитных аномалий при помощи магнитного обнаружителя // Измерительная техника». 2012. №12. С. 47–49.
8. Анцев И.Г., Аверкиев В.В., Петухов Ю.М. Нелинейный компенсатор магнитных помех авиационной магнитометрической системы // Измерительная техника». 2014. №3. С. 62–64.
9. Анцев И.Г., Аверкиев В.В., Петухов Ю.М. Нелинейный компенсатор магнитных помех авиационной магнитометрической системы. Алгоритм АНН-2 // Измерительная техника. 2015. №3. С. 55–57.
10. Meyer, B., Chulliat, A., and Saltus, R., Derivation and Error Analysis of the Earth Magnetic Anomaly Grid at 2 arc min Resolution Version 3 (EMAG2v3), *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18, 4522–4537.
11. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том I. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции. Нью-Йорк, 1968. М.: Советское радио, 1972.
12. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения. Тверь: Книжный клуб, 2009. 360 с.
13. Белоглазов И.Н., Тарасенко В.П. Корреляционно-экстремальные системы. М.: Радио, 1974. 392 с.
14. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. М.: Наука, 1985. 328 с.
15. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Магнитоградиентные измерительные системы и комплексы: монография в двух томах. М.: ИПУ РАН, 2018.
16. Мойланен Е.В., Павлов Б.В. Интегрированные навигационные системы с коррекцией по геофизическим полям // Труды XIX международной конференции по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 2012. С. 642–645.
17. Акимов П.С., Бакут П.А., Богданович В.А. и др. Теория обнаружения сигналов. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.
18. Bickel, S.H., Small Signal Compensation of Magnetic Fields Resulting from Aircraft Maneuvers, *IEEE Trans. v. AES-15*, 1979, no. 4.
19. Хвостов О.П. Теория разделения магнитных помех носителя магнитометра // Геофизическое приборостроение. 1962. Вып. 14.
20. Leach, B.W., Aeromagnetic Compensation as a Linear Regression Problem, *Information Linkage between Applied Mathematics and Industry*, Academic Press, 1980, pp. 139–161.
21. Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Августов Л.И. Анализ информативности магнитного поля Земли для автономной корреляционно-экстремальной навигации // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2017. Т. 10. № 1. С. 61–67.

22. Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Магнитные карты нового поколения для целей морской магнитной навигации // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Нестор-История, 2014.
 23. Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Результаты разработки и применения компонентной модели магнитного поля Земли в интересах магнитной картографии и геофизики // Фундаментальная и прикладная геофизика. 2016. Т. 9, № 2. С. 88–106.
 24. Xingen Liu, Zifan Yuan, Changping Du, Xiang Peng, Hong Guo, and Mingyao Xia, Adaptive Basis Function Method for the Detection of an Undersurface Magnetic Anomaly Target, *Remote Sens.*, 2024, 16, 363.
-

Antsev, G.V., Averkiev, V.V., Mogilevkin, V.A., Chernyaev, I.A. (JSC Radar mms, St. Petersburg, Russia) Dipole Signal Detection against the Noise Background under Random Motion of the Magnetometer Carrier, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2024, vol. 32, no. 1 (124), pp. 72–83.

Abstract. The paper considers an algorithm used to detect a dipole signal against the noise background under arbitrary motion of the magnetometer platform. The constructed mathematical model of the dipole signal in the form of a series of six basis functions allows both detection and estimation of the source position with one contact. The hardware-in-the-loop simulation results have been presented.

Key words: dipole source, expansion into a series of basis functions, arbitrary motion of magnetometer carrier, source position estimation.

Материал поступил 07.02.2024