

Оптимизация поиска локальных магнитных аномалий при помощи магнитного обнаружителя

В. В. АВЕРКИЕВ, Ю. М. ПЕТУХОВ

ОАО «НПП «Радар ммс», С.-Петербург, Россия, e-mail: averkiev_vv@radar-mms.com

Исследованы условия, обеспечивающие максимум вероятности обнаружения локальной магнитной аномалии в заданном районе поиска. Показана необходимость согласования траектории движения носителя магнитного обнаружителя с физическими параметрами, которыми характеризуется район поиска аномалии.

Ключевые слова: локальная магнитная аномалия, магнитный обнаружитель, скалярный магнитометр, ситуационная вероятность.

The conditions maximizing the probability of local magnetic anomaly detection in a given search region are investigated. It is shown that a motion path of magnetic anomaly detector carrier should be matched with physical parameters characterizing the anomaly search region.

Key words: local magnetic anomaly, magnetic detector, scalar magnetometer, layout probability.

Современные магнитные обнаружители (МО) локальных магнитных аномалий (ЛМА), создаваемых магнитными объектами, в частности, скрытыми подводными объектами, представляют собой пассивные информационно-измерительные системы, в основу которых положены оптимальные алгоритмы обработки показаний скалярного магнитометра (СМ), установленного на авиационном носителе (см., например [1—4]).

Предметом настоящей работы является исследование процедуры поиска ЛМА для выбора такой траектории движения носителя СМ, которая обеспечивает максимум статистики МО в заданном районе поиска. Будет показано, что если траектория движения носителя не согласована с физическими параметрами, которыми характеризуется район поиска, то поиск ЛМА может сопровождаться уменьшением вероятности обнаружения цели, которая достигает экстремально малых значений в высоких широтах Мирового океана.

Исследование проводили с использованием дискретной модели частично скомпенсированного сигнала ΔU_{j+n} , поступающего от СМ, которая в скользящем окне обработки данных имеет вид [3]:

$$\Delta U_{j+n} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \Phi_{ij+n}(\mathbf{D}) + \sum_{m=1}^M \rho_m \Psi_{mj+n} + \mu_{j+n} + \varepsilon_{j+n}, \quad (1)$$

где ΔU_{j+n} — сигнал СМ, из которого исключена магнитная помеха носителя (она устраняется при помощи автономного компенсатора магнитных помех носителя); α_i, ρ_m — коэффициенты разложения составляющих магнитометрического сигнала, создаваемых соответственно ЛМА и помехами; j, n — номера окна такта измерений в j -м окне обработки данных; $j - N/2 \leq n \leq j + N/2$; N — протяженность (в тактах) окна; $\Phi_{ij+n}(\mathbf{D})$ — базисные функции магнитного диполя, которыми аппроксимируется источник ЛМА — искомый объект; \mathbf{D} — вектор траверзной дальности, в системе координат носителя $\mathbf{D} = (0, D_y, D_z)$; D_y, D_z — боковое уклонение и вертикальное расстояние до ЛМА; Ψ_{mj+n} — базисные функции составляющей магнитометрического сигнала, создаваемой магнитными помехами, которые отличаются от помех носителя; μ_{j+n} —

погрешность аппроксимации модели сигнала СМ; ε_{j+n} — инструментальный шум СМ, который аппроксимируем нормальным белым шумом.

В многоканальном обнаружителе ЛМА q -й канал настроен на траверзную дальность D_q . В качестве канальной статистики L_{qj} рассматриваем формируемую в этом канале оценку энергии той составляющей сигнала ЛМА, которая ортогональна пространству помех, заданному функциями Ψ_{mj+n} . Этим обеспечивается независимость статистики L_{qj} от помех [5]. Ограничимся рассмотрением помех среды, обусловленных постоянно действующим фактором — магнитным полем Земли (МПЗ).

Для канальной статистики МО, на вход которого поступает магнитометрический сигнал (1), получено выражение

$$L_{qj} = \|\Phi_j(D, D_q) \alpha\|^2 + \|\Pi_{qj}\|^2 + 2(\Pi_{qj} + \Phi_j(D, D_q) \alpha), \quad (2)$$

где $\Phi_j(D, D_q)$ — корреляционная матрица q -го канала, элементы которой даются соотношением

$$\Phi_{ikj} = \sum_{n=-N/2}^{N/2} \bar{\Phi}_{in}(D_q) \Phi_{kj+n}(D), \quad i, k = \overline{1, 3}; \quad (3)$$

$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)^T$ — вектор коэффициентов составляющей магнитометрического сигнала, создаваемой ЛМА; $\Pi_{qj} = (\Pi_{qj1}, \Pi_{qj2}, \Pi_{qj3})^T$ — векторный параметр, характеризующий влияние инструментального шума СМ и остаточных помех на статистику L_{qj} , причем составляющие вектора Π_{qj} представляют собой проекции инструментального шума и остаточных помех на ортонормированные сигнальные базисные функции $\bar{\Phi}_{in}(D_q)$ q -го канала,

$$\Pi_{qji} = \sum_{n=-N/2}^{N/2} (\mu_{j+n} + \varepsilon_{j+n}) \bar{\Phi}_{in}(D_q), \quad i = \overline{1, 3}; \quad (4)$$

$\bar{\Phi}_{in}(D_q)$ — сигнальные базисные функции, которые входят в (3), (4) и являются составной частью ортонормированной системы $\{\bar{\Psi}_{mn}, \bar{\Phi}_{in}(D_q)\}$ базисных функций q -го канала МО.

В соответствии с (2) канальная статистика определяется суперпозицией трех составляющих: первая описывает сигнальную составляющую L_{Sqi} , индуцированную ЛМА, вторая — помеховую составляющую L_{Nqi} , источником которой является суперпозиция остаточных помех и инструментального шума СМ, а третья составляющая L_{SNqi} обусловлена корреляционной связью между сигнальной и помеховой составляющими в скользящем окне обработки данных.

Ниже исследована вероятность обнаружения $P_{по}$, которая определяется поисковой ситуацией. Эту вероятность будем называть ситуационной. Она обусловлена априорной неопределенностью таких элементов поисковой ситуации, как направление и величина магнитного момента искомого объекта, расстояние по вертикали и боковое уклонение объекта от траектории движения носителя и при заданной вероятности распределения последних определяется зависимостью дипольной составляющей сигнала СМ от априори известных элементов поисковой ситуации: магнитного наклона района поиска и курса носителя. Поскольку ситуационная вероятность $P_{по}$ определена только сигнальной составляющей канальной статистики L_{qj} , т. е.

$$L_{Sqi} = \|\Phi_j(D, D_q) \alpha\|^2, \quad (5)$$

она представляет собой максимально возможную вероятность правильного обнаружения ЛМА, которая достижима в условиях заданной поисковой ситуации.

Исследование ситуационной вероятности $P_{по}$ выполнено посредством имитационного математического моделирования МО. Оно основано на нахождении и анализе зависимости максимума сигнальной составляющей канальной статистики $L_{Sq} = \max_j(L_{Sqi})$ от известных физических пара-

метров, которыми характеризуется район поиска и схема движения носителя СМ. Район поиска ЛМА характеризуем углом магнитного наклона J вектора индукции геомагнитного поля, в качестве параметра движения носителя принят его магнитный курс w .

Чтобы понять, какие факторы обуславливают зависимость $P_{по}$ от известных параметров поисковой ситуации J и w , определим аналогичную зависимость сигнальной составляющей статистики L_{Sq} от этих параметров. Поскольку L_{Sq} зависит также от неизвестных параметров поисковой ситуации, ее значения являются неопределенными в меру неопределенности этих параметров. Для преодоления априорной неопределенности статисти-

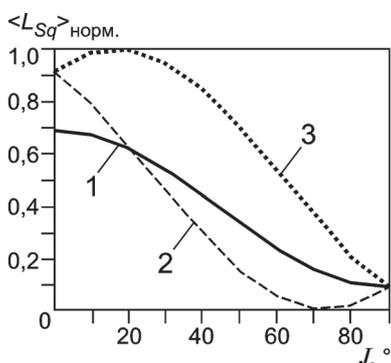


Рис. 1. Зависимости нормированной статистики МО при $D = 800$ м, $D_z = 200$ м от магнитного наклона района поиска:

1 — $w = 0^\circ$, $D_y = \pm 775$ м; 2 — $w = 90^\circ$, $D_y = 775$ м; 3 — $w = 90^\circ$, $D_y = -775$ м

стики L_{Sq} усредним ее по неизвестным параметрам и в качестве оценки искомой зависимости примем усредненную зависимость $\langle L_{Sq}(J, w) \rangle$.

На рис. 1 приведены зависимости нормированной статистики $\langle L_{Sq} \rangle$ от угла магнитно-

го наклона J на магнитных курсах носителя $w = 0$ и 90° . Усреднение выполнено по неизвестному курсу объекта в предположении равномерного распределения последнего в диапазоне $0 - 360^\circ$. Остальные параметры поисковой ситуации полагаем известными. Считаем, что магнитный момент объекта имеет только горизонтальную составляющую. Для траверсной дальности принято $D = 800$ м, вертикальное расстояние до объекта составляет $D_z = 200$ м, боковое уклонение $D_y = \sqrt{D^2 - D_z^2} = \pm 775$ м. Также принято, что q -й канал МО настроен на дальность D_q , равную D . Система канальных базисных функций включает три функции магнитного диполя $\bar{\Phi}_{in}(D_q)$ и три помеховые функции $\bar{\Psi}_{mn}$, которыми моделируются постоянная, линейная и квадратичная составляющие МПЗ на интервале обработки.

Из графиков, представленных на рис. 1, следует, что в районах поиска ЛМА, где $0 < J < 20^\circ$, поиск на курсе $w = 90^\circ$ статистически более эффективен, чем на курсе $w = 0^\circ$, поскольку обеспечивает более высокое значение статистики МО.

В районах поиска ЛМА, где $20 < J < 90^\circ$, ситуация существенно иная: при пролете носителя справа от объекта ($D_y < 0$) значение статистики $\langle L_{Sq} \rangle$ на курсе $w = 90^\circ$ больше, чем на курсе $w = 0^\circ$; при пролете носителя слева от объекта ($D_y > 0$) значение статистики $\langle L_{Sq} \rangle$ на курсе $w = 90^\circ$ меньше, чем на курсе $w = 0^\circ$. В частности, при $J = 70^\circ$ наблюдается экстремально малое отношение этих статистик

$$\frac{\langle L_{Sq}(w=90^\circ, D_y > 0) \rangle}{\langle L_{Sq}(w=0^\circ) \rangle} = 0,02.$$

На примере поиска ЛМА в районе, который характеризуется углом $J = 70^\circ$, покажем, к каким последствиям приводит данная ситуация. Пусть относительное значение порога обнаружения h выбрано равным 0,05. Из рис. 1 следуют неравенства

$$\langle L_{Sq}(w=0^\circ) \rangle > h; \quad \langle L_{Sq}(w=90^\circ, D_y < 0) \rangle > h;$$

$$\langle L_{Sq}(w=90^\circ, D_y > 0) \rangle < h.$$

Это означает, что при поиске ЛМА на курсе $w = 0^\circ$ каждый пролет носителя СМ в окрестности объекта на дальности D обеспечит превышение статистикой МО порога h , т. е. будет зафиксирован факт обнаружения. При поиске ЛМА на курсе $w = 90^\circ$ факт обнаружения на дальности D будет зафиксирован только при пролете носителя справа от объекта; при пролете носителя слева от объекта будет пропуск цели. Поскольку вероятности пролета справа и слева одинаковы, первичный контакт с каждой второй (в среднем) ЛМА, источником которой является магнитный объект, будет сопровождаться пропуском цели.

Выполненный анализ носит качественный характер, так как он оперирует с усредненными значениями статистики $\langle L_{Sq}(J, w) \rangle$, а не с теми, которые обусловлены случайными реализациями неизвестных параметров поисковой ситуации. Цель этого анализа — выяснить причину ожидаемой зависимости ситуационной вероятности $P_{по}$ от известных параметров поисковой ситуации.

Перейдем к рассмотрению собственно ситуационной вероятности $P_{\text{по}}$. На рис. 2 приведена зависимость $P_{\text{по}}(J)$ для курсов носителя $w = 0$ и 90° . Эта вероятность определена как отношение числа реализаций статистики L_{Sq} , превышающих порог обнаружения h , к общему числу реализаций для заданной вероятности распределения неизвестных параметров поисковой ситуации. В данном случае полагаем, что неизвестным является только курс искомого объекта, который равномерно распределен в диапазоне $0 - 360^\circ$. Значения остальных параметров поисковой ситуации указаны ранее. Для выбранного относительного значения порога h зависимость $P_{\text{по}}(J, w)$ полностью согласуется с выводами анализа усредненных статистик $L_{Sq}(J, w)$, который представлен выше.

Заметим, что для заданной вероятности распределения априори неизвестных параметров поисковой ситуации ситуационная вероятность $P_{\text{по}}$ является функцией трех переменных — геомагнитного наклона района поиска J , курса носителя w и порога обнаружения h , т. е. $P_{\text{по}} = P_{\text{по}}(J, w, h)$. Эта зависимость позволяет заранее оценивать предельную вероятность обнаружения ЛМА в условиях реализованного уровня остаточных магнитных помех, которые задают порог h , а также планировать методику поиска, обеспечивающую максимальную вероятность обнаружения ЛМА в заданном районе поиска. Исследование зависимости $P_{\text{по}}(J, w, h)$ представляет самостоятельный интерес и может быть предметом отдельной работы.

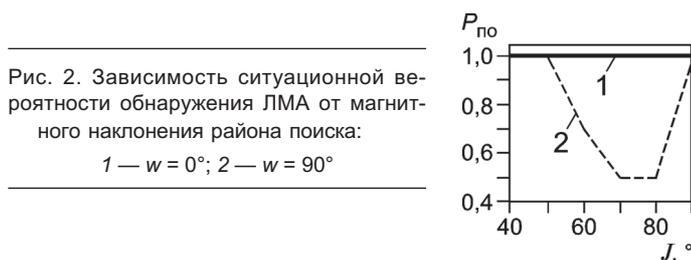


Рис. 2. Зависимость ситуационной вероятности обнаружения ЛМА от магнитного наклона района поиска:

1 — $w = 0^\circ$; 2 — $w = 90^\circ$

Л и т е р а т у р а

1. Яроцкий В. А. Оптимальное обнаружение магнитного диполя // Измерительная техника. 1992. № 10. С. 43—45; Yarotskii V. A. Optimum detection of magnetic dipoles // Measurements Techniques. 1992. V. 35. N 10. P. 1190—1194.
2. Долинский М. Ю., Долинский Ю. Д. Оптимальный обнаружитель сигнала намагниченного тела // Геофизическая аппаратура. 1993. № 97. С. 38—44.
3. Семевский Р. Б., Аверкиев В. В., Яроцкий В. А. Специальная магнитометрия. СПб.: Наука, 2002.
4. Пат. 2411550 РФ. Способ обнаружения локальной магнитной аномалии / В. В. Аверкиев, Ю. М. Петухов // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 4.
5. Акимов П. С. и др. Теория обнаружения сигналов. М.: Радио и связь, 1984.

Дата принятия 05.07.2012 г

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

534.6+612.172.4:57.02

Параметры информационной энтропии диаграммы ритма сердца

А. А. КУЗНЕЦОВ

Владимирский государственный университет, Владимир, Россия, e-mail: artemi-k@mail.ru

Приведены методики, формулы и результаты расчета информационной энтропии и ее параметров по столбцам гистограммы и ярусной модели диаграммы ритма сердца. По данным анализа виртуальных диаграмм ритма сердца получены свидетельства недостоверности методики расчета энтропии и ее параметров по столбцам гистограммы. Вскрытые недостатки отсутствуют в альтернативной ярусной модели, в рамках которой определены параметры информационной энтропии.

Ключевые слова: диаграмма ритма сердца, информационная энтропия, абсолютная и относительная погрешности.

The procedures calculation formulas and results of informational entropy and its parameters calculation by histogram columns and a heart rhythm diagram tier model are given. According to data of the analysis of virtual heart rhythm diagrams the evidences of unreliability of the procedure of informational entropy and its parameters calculation by histogram columns were received. The uncovered shortcomings are absent in the alternative tier model by means of which the informational entropy parameters were determined.

Key words: heart rhythm diagram, informational entropy, absolute and relative errors.

Постановка задачи. При отсутствии посторонних источников доминирующего влияния при регистрации физического процесса параметрические флуктуации в форме единого

нестационарного случайного процесса проявляются в результате совместного действия факторов малого влияния. Вне зависимости от закона распределения текущих вкладов