

КОМПЕНСАЦИЯ НАВЕДЕННОЙ ПОМЕХИ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ДВУХ ДИПОЛЕЙ

Третьякова Е. А.¹

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Решение задачи относительного позиционирования источника и приёмника переменного магнитного поля заключается в определении радиус-вектора между рассматриваемыми объектами и их взаимной ориентации. Рассмотрены алгоритмы относительного позиционирования в электромагнитном поле двух диполей в трёхмерной и двумерной постановках. Проведено сравнение результатов, полученных при обработке экспериментальных данных аэроэлектроразведочной системы ЕМ4Н. Также проведена компенсация наведенной помехи по измерениям поля двух диполей для аэроэлектроразведочных систем ЭКВАТОР и ЕМ4Н в нескольких модификациях: с креплением петли передатчика на фюзеляже вертолета Ми-8, с креплением петли передатчика на фюзеляже самолета Ан-3, с буксируемой петлей передатчика за вертолетом Eurocopter AS350В3. Выполнено сравнение с традиционным методом компенсации по измерениям поля трёх диполей. Анализировались остаточные после компенсации помех сигналы. Показано, что качество компенсации в поле двух диполей не уступает традиционному.

Ключевые слова: относительное позиционирование, переменное электромагнитное поле, источник, приёмник, компенсация, магнитный диполь.

1. Введение

Аэроэлектроразведка – метод аэрогеофизической съёмки, в котором исследуется распределение удельной электропроводности с помощью установленного на летательном аппарате оборудования [6, 10, 17, 21]. Применяется для поиска алмазов [14, 19], воды [9, 20], золота [8, 18] и других рудных полезных ископаемых. Генерируемое источником *первичное* переменное магнитное поле рассматривается как поле диполя, характеристикой которого является вектор дипольного магнитного момента \mathbf{M} .

¹ Екатерина Алексеевна Третьякова, инженер (ekaterina_tretikova@mail.ru).

В среде, проводящей электрический ток, переменное магнитное поле приводит к возникновению вихревых токов, порождающих *вторичное* магнитное поле – отклик среды. Измерителем поля в случае рассматриваемых в работе систем служит трехкомпонентный векторный индукционный приемник, который находится в буксируемой гондоле. Источник и приемник соединяет кабель-трос. Их взаимное расположение определяется радиус-вектором \mathbf{R} .

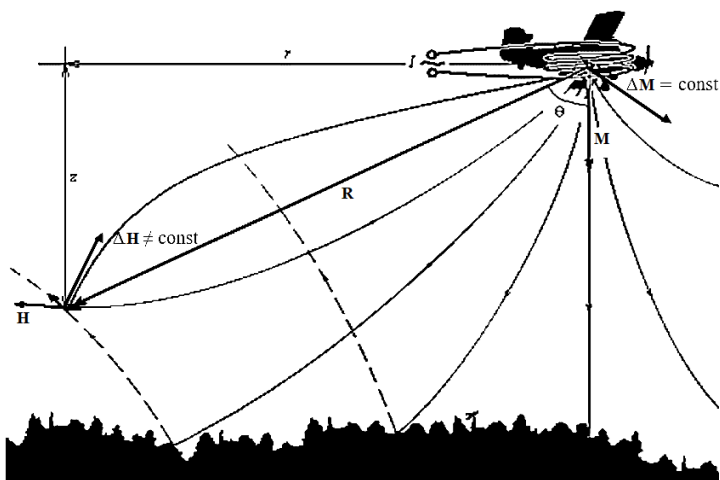


Рис. 1. Аэроэлектроразведка. \mathbf{R} – радиус-вектор источник-приемник; \mathbf{M} – вектор магнитного момента возбуждающего диполя; $\Delta\mathbf{M}$ – вектор магнитного момента наведенного поля; \mathbf{H} – вектор напряженности поля возбуждающего диполя; $\Delta\mathbf{H}$ – вектор напряженности наведенного поля

В процессе работы аэроэлектроразведочной системы появляются помехи, которые представляют собой вектор напряженности *наведенного* поля $\Delta\mathbf{H}$. Основным источником этого поля являются неконтролируемые вихревые токи, возникающие в проводящих элементах несущей конструкции и летательного аппарата (рис. 1). Дипольный момент, создаваемый этими токами, – $\Delta\mathbf{M}$. Для того чтобы учесть влияние помех, проводится

этап компенсации. Его суть заключается в перемещении системы на большую высоту (500–700 м), где можно пренебречь откликами от Земли. Далее определяются параметры наведённого поля и поправки вводятся в измерения поля на высоте съёмки. Есть различные подходы к методу компенсации. Если приемник совершает незначительные перемещения относительно передатчика, можно считать, что вектор напряжённости наведённого поля – постоянный в системе координат приемника. В этом предположении можно просто вычесть из измерений на рабочей высоте среднее значение на высоте компенсации (nulling) [16]. Другой подход – учитывать непостоянство вектора $\Delta\mathbf{H}$, анализируя взаимное пространственное и угловое расположение передатчика и приёмника [2]. В данной работе рассмотрены алгоритмы решения задачи относительного позиционирования источника и приемника несколькими способами: в поле двух диполей в плоскости [11] и в поле двух диполей в трехмерном пространстве [15].

2. Компенсация с учётом изменяющегося взаимного расположения источника и приёмника

2.1. КОМПЕНСАЦИЯ ДЛЯ СЛУЧАЯ ТРЕХ ДИПОЛЕЙ

В работе рассматриваются электромагнитные системы, для которых справедлива зависимость для поля точечного диполя [4, 5]. В работах [11, 13] оно записано в матричной форме:

$$(1) \quad \mathbf{H} = \frac{1}{4\pi|\mathbf{R}|^3} \left(3 \frac{\mathbf{R}\mathbf{R}^T}{|\mathbf{R}|^2} - I \right) \mathbf{M} = \Omega(\mathbf{R})\mathbf{M},$$

где \mathbf{R} – радиус-вектор точки относительно передатчика; \mathbf{H} – вектор напряжённости магнитного поля; \mathbf{M} – вектор магнитного момента диполя; I – единичная матрица 3×3 .

В работе [2] получена взаимосвязь измеряемого поля, генерируемого момента и положения передатчика относительно приёмника в матричном виде, которая является абсолютно такой же и для зависимости $\Delta\mathbf{H}$ от $\Delta\mathbf{M}$:

$$(2) \quad \Delta\mathbf{H} = \Omega(\mathbf{R})\Delta\mathbf{M}.$$

Предлагается ввести два дополнительных диполя с линейно независимыми векторами моментов \mathbf{M}_1 и \mathbf{M}_2 . С их помощью вектор магнитного момента наведённого поля $\Delta\mathbf{M}$ можно разложить в базисе известных моментов:

$$(3) \quad \Delta\mathbf{M} = k_0\mathbf{M} + k_1\mathbf{M}_1 + k_2\mathbf{M}_2, \quad k_j \in \mathbf{R}.$$

Применяя (2), вектор напряжённости наведённого поля:

$$(4) \quad \Delta\mathbf{H} = k_0\mathbf{H} + k_1\mathbf{H}_1 + k_2\mathbf{H}_2.$$

Этап компенсации позволяет определить коэффициенты k_0 , k_1 , k_2 методом наименьших квадратов.

2.2. КОМПЕНСАЦИЯ ДЛЯ СЛУЧАЯ ДВУХ ДИПОЛЕЙ

Пусть известны моменты возбуждающих диполей как постоянные величины: \mathbf{M} – основной и \mathbf{M}_1 – вспомогательный. Измерены векторы \mathbf{H} и \mathbf{H}_1 . Опираясь на работу [16]:

$$(5) \quad \Omega(\mathbf{R}) = F(\mathbf{H}, \mathbf{H}_1, \mathbf{M}, \mathbf{M}_1).$$

При рассмотрении какого-либо другого диполя с моментом μ_2 , которому отвечает вектор напряжённости \mathbf{h}_2

$$(6) \quad \mathbf{h}_2 = \Omega(\mathbf{R}) \cdot \mu_2 = F(\mathbf{H}, \mathbf{H}_1, \mathbf{M}, \mathbf{M}_1) \cdot \mu_2.$$

Третий вектор напряжённости может быть выражен через зависимость от двух других диполей:

$$(7) \quad \mathbf{H}'_2 = F_2(\mathbf{H}, \mathbf{H}_1).$$

Можно перейти к рассмотренной ранее линейной комбинации вектора наведенного поля (4) путем подстановки полученной зависимости (7):

$$(8) \quad \Delta\mathbf{H} = k_0\mathbf{H} + k_1\mathbf{H}_1 + k_2F_2(\mathbf{H}, \mathbf{H}_1).$$

Как правило, величина относительного пространственного смещения приемника и источника не превышает 10 м [7]. Данное наблюдение дает возможность предполагать, что зависимость (8) можно линеаризовать вблизи среднего значения расстояния, которому соответствует среднее значение величины вектора напряжённости. Точности линейного приближения будет достаточно для решения задачи компенсации.

Гипотеза. Ввиду небольших пространственных перемещений приемника относительно источника выражение (8) принимает вид:

$$(9) \quad \Delta \mathbf{H} = p_{01} \mathbf{H} + p_1 \mathbf{H}_1.$$

Далее данная гипотеза проверяется на серии экспериментальных данных системы ЭКВАТОР [1] с буксируемой петлей источника за вертолетом Eurocopter AS350B3 и различных модификаций системы ЕМ4Н [3]: с креплением петли источника на фюзеляже вертолета Ми-8, с креплением петли источника на фюзеляже самолета Ан-3, с буксируемой петлей источника за вертолетом Eurocopter AS350B3, полученных при съёмочных полетах ООО «Геотехнологии», НФ ВСЕГЕИ и АО «ГНПП Аэрогеофизика».

Адекватность результата компенсации проще всего оценивать по остаточной квадратурной компоненте поля, которая отличается на 90° по фазе от первичного поля. Оценивание происходит для определённых частот раздельно. В идеальных условиях отсутствия помех квадратурная составляющая должна быть равна нулю [12]. Анализировались остаточные после компенсации сигналы: среднеквадратичное отклонение и разброс между минимальным и максимальным значением (величина поля порядка 10^4 условных единиц).

Результаты сравнения остаточных после компенсации помех на различных частотах для электроразведочных систем ЭКВАТОР и модификаций системы ЕМ4Н показаны в таблицах (таблица 1, таблица 2). Один из столбцов таблиц – коэффициент улучшения, полученный как отношение соответствующих значений при простом вычитании среднего значения и компенсации с использованием одного (первого) диполя.

На рисунке (рис. 2) показаны значения после компенсации в случае определения геометрических параметров с использованием одного, второго или двух одновременно дополнительных диполей и в случае вычитания среднего значения (nulling).

Таблица 1. Остаточные после компенсации сигналы на высоких частотах (8 кГц – ЕМ4Н, 6кГц – ЭКВАТОР)

	Nulling	Первый и второй диполи	Первый диполь	Второй диполь	Коэф. улучшения	
Самолет	4,53		2,17		2,1	СКО
	41,92		15,04		2,8	max-min
Вертолет фикс.	2,37	1,91	1,92	1,92	1,2	СКО
	14,97	13,01	12,76	13,16	1,2	max-min
Вертолет буксир.	20,27	1,16	1,28	1,37	15,8	СКО
	92,88	8,14	8,10	9,34	11,5	max-min
Экватор	11,04	1,15	1,17	1,42	9,44	СКО
	53,47	9,59	10,08	10,75	5,30	max-min

Таблица 2. Остаточные после компенсации сигналы на низких частотах (130 Гц – ЕМ4Н, 77 Гц – ЭКВАТОР)

	Nulling	Первый и второй диполи	Первый диполь	Второй диполь	Коэф. улучшения	
Самолет	12,61		2,52		5,0	СКО
	121,53		21,42		5,7	max-min
Вертолет фикс	2,82	1,42	1,46	1,4	1,9	СКО
	14,18	8,42	8,29	8,62	1,7	max-min
Вертолет буксир	1,73	1,44	1,46	1,46	1,2	СКО
	10,70	10,09	9,65	9,16	1,1	max-min
Экватор	0,29	0,22	0,22	0,23	1,3	СКО
	1,84	1,56	1,59	1,71	1,1	max-min

Теоретически показано и подтверждено на практике, что при имеющемся диапазоне изменений взаимного расположения источника и приемника задача компенсации наведенного поля может быть успешно решена с использованием лишь одного дополнительного диполя. Более того, неважно какого именно из дополнительных. Также показано преимущество метода компенсации, учитывающего относительное позиционирование.

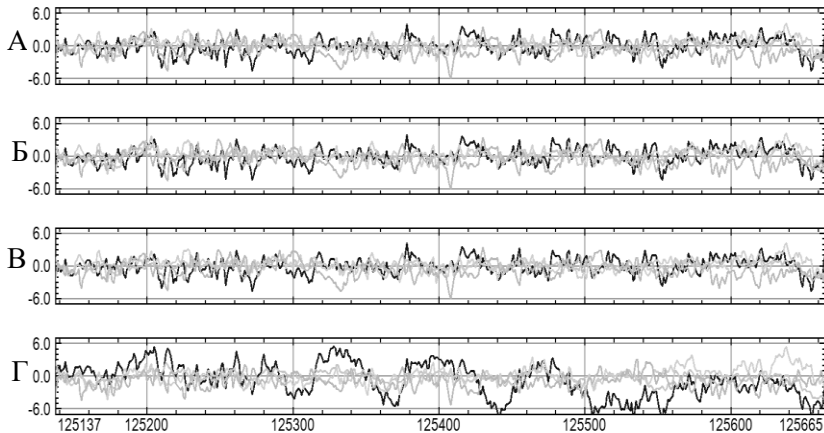


Рис. 2. Квадратурная компонента для вертолета Ми-8 на четырёх частотах: А – после компенсации с учетом измерений параметров двух дополнительных диполей; Б – с использованием 1-го диполя, В – с использованием 2-го диполя, Г – nulling

3. Калибровка магнитного момента возбуждающего диполя

Для решения задачи относительного позиционирования необходимо определить величину магнитных моментов, которые генерируются диполями: основным и вспомогательным. Из выражения (1) при помощи обратной матрицы перехода можно получить зависимость магнитного момента от напряженности:

$$(10) \mathbf{M} = \Theta(\mathbf{R})\mathbf{H},$$

$$(11) |\mathbf{M}| = 2\pi \cdot R^3 \left[\left[(3\mathbf{e}_R \mathbf{e}_R^T - 2I) \cdot \mathbf{H} \right] \right].$$

Необходимая информация может быть получена от дополнительных источников, например, от спутниковой навигационной системы. Результатом калибровки принимается среднее значение полученной оценки величины магнитного момента (рис. 3).

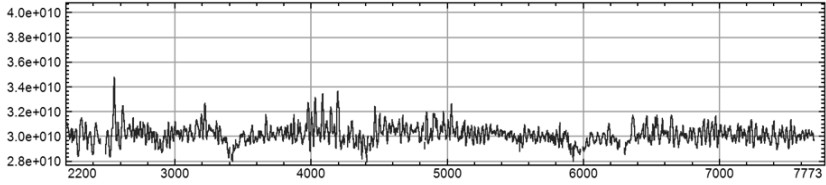


Рис. 3. Калибровка магнитного момента

4. Решение задачи относительного позиционирования в поле двух диполей

4.1. ЗАДАЧА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

В работе [15] предложен алгоритм решения задачи электромагнитного позиционирования по полю двух диполей в трехмерной постановке. Работу можно разделить на два этапа.

Первый этап позволяет определить модуль радиус-вектора. Из исходного уравнения (1) авторами получена система:

$$\begin{aligned} 3(M_1^T e)^2 &= p^2 H_1^2 - M_1^2, \\ (12) \quad 3(M_2^T e)^2 &= p^2 H_2^2 - M_2^2, \\ 3(M_1^T e)(M_2^T e) &= p^2 H_1^T H_2 - M_1^T M_2. \end{aligned}$$

Если выразить из первых двух уравнений компоненты $M_i^T e$ и подставить в третье, то будет получено квадратное уравнение относительно p^2 . Опираясь на доказанные авторами теоремы, можно определить p^2 как наибольший из двух корней квадратного уравнения:

$$(13) \quad p(x) = \sqrt{q_{max}},$$

$$(14) \quad r(x) = (4\pi)^{\frac{1}{3}} q_{max}^{\frac{1}{6}}.$$

Второй этап включает определение матрицы ориентации. Авторы опираются на теорему Эйлера, согласно которой любое смещение твердого тела в трехмерном пространстве можно представить через один поворот вокруг определенной оси, про-

ходящей через единственную неподвижную точку этого твердого тела:

$$(15) R = \cos \varphi I + \sin \varphi \Lambda_w + (1 - \cos \varphi) w w^T,$$

где w – единичный направляющий вектор оси вращения:

$$\varphi - \text{угол поворота}; \Lambda_w = \begin{pmatrix} 0 & -w_3 & w_2 \\ w_3 & 0 & -w_1 \\ -w_2 & w_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Из (15) путем умножения на $m^T m$ получаем

$$(16) \cos \varphi = \frac{m^T R m - (m^T w)^2}{m^2 - (m^T w)^2} \quad \forall m \in R^3.$$

Значение угла предполагается положительным из соображений ограниченных перемещений установки.

Авторами рассматриваются всевозможные случаи взаимного расположения источника и приемника. Оцениваются эти случаи по взаиморасположению векторов m_i и h_i (рис. 4).

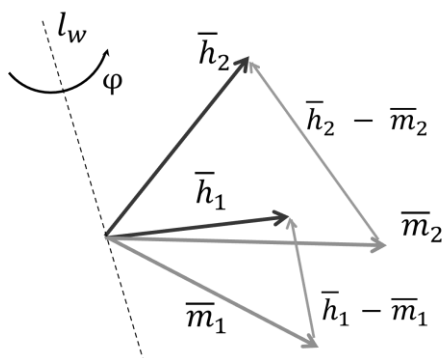


Рис. 4. Определение ориентации

1. $(h_1 - m_1) \times (h_2 - m_2) \neq \bar{0}$ – стандартное положение:

$$(17) w = \frac{(h_1 - m_1) \times (h_2 - m_2)}{|(h_1 - m_1) \times (h_2 - m_2)|}.$$

$$2. (h_1 - m_1) \times (h_2 - m_2) = \bar{0}, (m_1 \times m_2) \times (h_1 \times h_2) \neq \bar{0} :$$

$$(18) w = \frac{(m_1 \times m_2) \times (h_1 \times h_2)}{|(m_1 \times m_2) \times (h_1 \times h_2)|}.$$

$$3. (h_1 - m_1) \times (h_2 - m_2) = \bar{0}, (m_1 \times m_2) \times (h_1 \times h_2) = \bar{0},$$

$$|m_1 - h_1| + |m_2 - h_2| \neq \bar{0} :$$

$$(19) w = \frac{m_2 + h_2 - m_1 - h_1}{|m_2 + h_2 - m_1 - h_1|}, \quad \varphi = \pi .$$

$$4. (h_1 - m_1) \times (h_2 - m_2) = \bar{0}, (m_1 \times m_2) \times (h_1 \times h_2) = \bar{0},$$

$$|m_1 - h_1| + |m_2 - h_2| = \bar{0} : \varphi = 0, R = I.$$

На практике определение оси вращения не выходит за рамки первого случая в рамках стандартного расположения источника и приемника во время полета.

4.2. ЗАДАЧА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В ДВУМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Из имеющегося набора данных за последние 20 лет можно сделать вывод о том, что гондола с установленным в ней приемником переменного магнитного поля делает небольшие боковые отклонения от вертикальной плоскости вдоль направления полета ЛА. Поэтому имеет смысл рассмотреть задачу в двумерной постановке (рис. 5).

Аэроразведочная установка включает в себя источник и трехкомпонентный приемник переменного магнитного поля. Источником первичного поля служит система петлевых дипольных излучателей, подпитываемых переменным током на разных частотах. Плоскости петель расположены взаимно перпендикулярно. Вектор момента для каждой из них лежит перпендикулярно плоскости. Получившиеся дипольные магнитные моменты и их общее начало задают условную систему координат источника XOY . Измерителем поля в случае рассматриваемых в работе систем служит трехкомпонентный векторный индукционный приемник, который находится в буксируемой гондоле. Напряженность переменного магнитного поля измеряется

покомпонентно в системе координат приемника $X^R O^R Y^R$. Источник и приёмник поля соединяет радиус-вектор \mathbf{R} с единичным направляющим вектором \mathbf{e}_R (рис. 5).

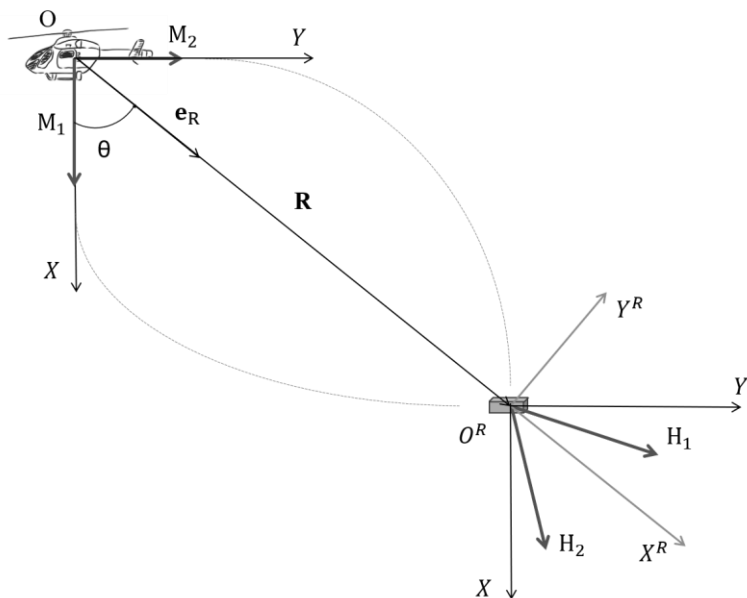


Рис. 5. Системы координат источника и приемника

Вводятся углы: α – угол между векторами напряженности магнитного поля в точке расположения приемника; θ – угол между главным диполем \mathbf{M}_1 и вектором \mathbf{e}_R . Векторы магнитных моментов возбуждающих диполей \mathbf{M}_1 и \mathbf{M}_2 считаем известными после этапа калибровки: $\mathbf{M}_1 = (M_1^X, 0)^T$, $\mathbf{M}_2 = (0, M_2^X)^T$. Задача позиционирования рассматривается в плоскости, задаваемой этими векторами. Векторы напряженности магнитного поля считаем измеренными: $\mathbf{H}_1 = (H_1^X, H_1^Y)^T$, $\mathbf{H}_2 = (H_2^X, H_2^Y)^T$. Согласно гипотезе, предполагаем, что плоскость векторов магнитных моментов совпадает с плоскостью векторов напряженности магнитного поля, поэтому плоский угол φ находится как угол поворота системы координат $X^R O^R Y^R$ относительно XOY .

Углы α и θ связаны выражением, которое можно получить из (1) в предположении единичной амплитуды магнитного момента и единичного радиус-вектора:

$$(20) \operatorname{ctg} \alpha = \frac{3}{4} \sin 2\theta.$$

Определив угол направления «на гондолу», можно перейти к нахождению расстояния:

$$(21) |\mathbf{R}| = \sqrt[3]{\frac{|\mathbf{M}_i|}{\|(3\mathbf{e}_R \mathbf{e}_R^T - 2I) \cdot 2\pi \cdot \mathbf{H}_i\|}},$$

$$\text{где } (3\mathbf{e}_R \mathbf{e}_R^T - 2I) = \begin{pmatrix} 3\cos^2 \theta - 2 & 3\cos \theta \sin \theta \\ 3\cos \theta \sin \theta & 3\sin^2 \theta - 2 \end{pmatrix}.$$

Поворот системы координат $X^R O^R Y^R$ относительно XOY :

$$(22) X^R O^R Y^R \xrightarrow{\varphi} XOY,$$

$$(23) A_{OOR} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}.$$

Из соотношения $XOY = A_{OOR} \cdot X^R O^R Y^R$ можно определить плоский угол поворота φ .

4.3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛЯ РАССМОТРЕННЫХ АЛГОРИТМОВ

Решение задачи относительного позиционирования в двумерной и трехмерной постановках близко, что подтверждает адекватность линеаризации соотношения (8) в окрестности среднего положения гондолы (рис. 6).

Небольшие пики серого графика показывают моменты, когда гондола выходила из плоскости диполей. Оценка полученных результатов (таблица 3): среднеквадратичное отклонение (СКО) и среднее значение разности полученных результатов.

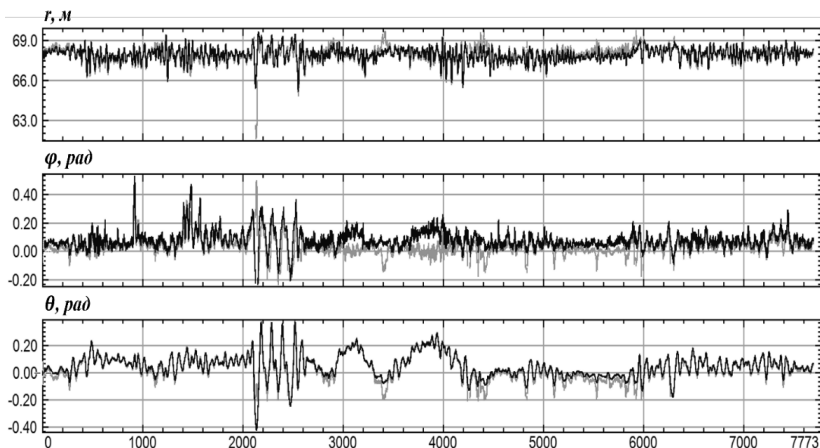


Рис. 6. Сравнение полученных результатов: модуля радиус-вектора, угла поворота системы и угла на гондолу. (серый – объемная постановка, чёрный – плоская постановка задачи)

Таблица 3. Сравнение трехмерного и двумерного подходов

	СКО	Среднее значение
$\Delta r = r(2D) - r(3D)$, м	0,30 (0,4%)	0,02
$\Delta \varphi = \varphi(2D) - \varphi(3D)$, рад	0,045 (4,5%)	-0,048
$\Delta \theta = \theta(2D) - \theta(3D)$, рад	0,025 (2,5%)	-0,011

Можно заметить, что среднее значение разности полученных результатов близко к нулю, а СКО не превышает 5% от среднего значения исследуемой величины. Для решения геофизических задач такой точности вполне достаточно, поэтому можно ограничиться двумерным решением задачи позиционирования.

Важно отметить, что чувствительность приемника является величиной порядка $10^{-4} \div 10^{-5}$ поэтому при соблюдении точной установки (исключая возможные систематические ошибки) можно говорить о шумах измерения расстояния между источником и приемником от 1 см до 1 мм, что как минимум не хуже, чем для спутниковой навигационной системы. Таким образом,

решение задачи позиционирования в трехмерной постановке может оказаться полезным в условиях отсутствия сигналов навигационных спутников.

5. Заключение

В данной работе теоретически показано и подтверждено на практике, что при имеющемся диапазоне изменений взаимного расположения источника и приемника переменного магнитного поля задача компенсации наведенной составляющей может быть успешно решена с применением только двух диполей.

Для всех вариантов применения системы ЕМ4Н и для системы ЭКВАТОР во время компенсации необходимо учитывать перемещение приемника относительно источника поля. Вследствие были реализованы алгоритмы относительного позиционирования. Решение в двумерной постановке отличается от трехмерной на величину порядка 1 метра в координатах и порядка 1 градуса – в углах ориентации. Такой точности достаточно для решения геофизических задач. Относительное позиционирование в трехмерной постановке может обеспечить точность, не уступающую решению спутниковой навигационной системы.

Практически важным является этап калибровки магнитных моментов, который позволил определить их величины для дальнейшего использования в алгоритмах относительного позиционирования.

Литература

1. ВОЛКОВИЦКИЙ А.К., КАРШАКОВ Е.В., МОЙЛАНЕН Е.В. *Новая вертолетная электроразведочная система «Экватор» для метода АМПП // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2010. – №2(32). – С. 27–29.*
2. ВОЛКОВИЦКИЙ А.К., КАРШАКОВ Е.В., ПОПОВИЧ В.В. *Компенсация влияния наведенных токов в низкочастотной индуктивной аэроэлектроразведочной системе ЕМ-4Н // Международная конференция, посвященная 50-летию Института геофизики УрО РАН. Екатеринбург, 2008. – С. 40–43.*

3. ВОЛКОВИЦКИЙ А.К., КАРШАКОВ Е.В., ПОПОВИЧ В.В. *Низкочастотная индуктивная аэроэлектроразведочная система EM-4H* // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 224–227.
4. ЖДАНОВ М.С. *Электроразведка: Учебник для вузов.* – М.: Недра, 1986. – 316 с.
5. ЖЕЛАМСКИЙ М.В. *Первая отечественная система магнитного позиционирования* // Датчики и системы. – 2009. – №1. – С. 2–7.
6. *Инструкция по электроразведке: наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахто-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка* // Под ред. Л.А. Рейхерта. – Л.: Недра, 1984. – 352 с.
7. КАРШАКОВ Е.В. *Структура и алгоритмы обработки бортовых измерений в аэромагнитных и аэроэлектромагнитных системах.* Дисс. докт. техн. наук. – 2018. – 286 с.
8. КЕРЦМАН В.М., МОЙЛАНЕН Е.В., ПОДМОГОВ Ю.Г. *Применение аэрогеофизики в зоне Центрально-Африканского разлома, на золоторудных месторождениях в Иркутской области (Сухой Лог, Урях) и в Якутии* // Золото и технологии. – 2020. – №4. – С. 74–80.
9. КОЗАК С.З., АГЕЕВ В.В., МОЙЛАНЕН Е.В., КАРШАКОВ Е.В., ТХОРЕНКО М.Ю. *Комплексирование наземной и вертолетной электроразведки методом переходных процессов при выделении участков, перспективных для бурения на воду (на 228 примере Якутии)* // Инженерные изыскания. – 2015. – №10–11. – С. 42–45.
10. МОЙЛАНЕН Е.В. *Современные методы аэроэлектроразведки* // Физика Земли. – 2022. – Т. 68, №5. – С. 171–180.
11. ПАВЛОВ Б.В., ВОЛКОВИЦКИЙ А.К., КАРШАКОВ Е.В. *Низкочастотная электромагнитная система относительной навигации и ориентации* // Гироскопия и навигация. – 2010. – С. 3–15.
12. СВЕТОВ Б.С. *Основы геоэлектрики.* – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 656 с.
13. ТХОРЕНКО М.Ю., КАРШАКОВ Е.В., ПАВЛОВ Б.В., КОЗЛОВ А.В. *Алгоритм позиционирования подвижного*

- объекта в низкочастотном электромагнитном поле // Автоматика и телемеханика. – 2015. – №11. – С. 160–173.
14. ФЕЛИКС Ж.Т., КАРШАКОВ Е.В., МЕЛЬНИКОВ П.В., ВАНЧУГОВ В.А. *Результаты сопоставления данных аэро- и наземных электроразведочных систем, используемых при поисках кимберлитов в республике Ангола* // Геофизика. – 2014. – №4. – С. 17–22.
 15. BARABANOVA L.P., BARABANOV O.O. *Effective solution of the problem of electromagnetic positioning based on two-axial radiator* // Journal of Mathematical Sciences. – 2021. – Vol. 255, No. 5. – P. 551–560.
 16. BRODIE R., SAMBRIDGE M. *A holistic approach to inversion of frequency-domain airborne EM data* // Geophysics. – 2006. – Vol. 71, No. 6.
 17. LEGAULT J.M. *Airborne Electromagnetic Systems – State of the Art and Future Directions* // CSEG Recorder. – 2015. – Vol. 40, No. 6. – P. 38-49.
 18. LEGAULT J.M., KWAN K., GREIG J., WEBSTER E., HANKI M. *Targeting epithermal Au-Ag using helicopter TDEM, magnetic, and radiometric data at Lawyers Project, North-Central BC, Canada* // Proc. of the 8th Int. Airborne Electromagnetics Workshop, 2023. (AEM-2023)
 19. PERSOVA M.G., SOLOVEICHIK Y.G., TRIGUBOVICH G.M., VAGIN D. V. et al. *Geometric 3-D inversion of airborne time-domain electromagnetic data with applications to kimberlite pipes prospecting in a complex medium* // Journal of Applied Geophysics. – 2022. – Vol. 200.
 20. RUTHERFORD J., IBRAHIMI T., MUNDAY T., MARKEY A. et al. *An Assessment of Water Sources for Heritage Listed Organic Mound Springs in NW Australia Using Airborne Geophysical (Electromagnetics and Magnetics) and Satellite Remote Sensing Methods* // Journal of Remote Sensing. – 2023. – Vol. 13(7). – P. 1288.
 21. TELFORD W.M., GELDART L.R., SHERIF R.E. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 2004. – 744 p

COMPENSATION OF INTERFERENCE IN AIRBORNE ELECTROMAGNETIC SYSTEMS AND SOLUTION OF THE PROBLEM OF RELATIVE POSITIONING IN THE ELECTROMAGNETIC TWO-DIPOLES FIELD

Ekaterina Tretyakova, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, student (ekaterina_tretikova@mail.ru).

Abstract: The solution of the problem of relative positioning of the alternating magnetic field transmitter and the receiver is to determine the radius vector between the objects under consideration and their mutual orientation. In this paper, algorithms for the relative positioning of two dipoles in an electromagnetic field in three-dimensional and two-dimensional formulations are considered. The results obtained during the processing of real data from the airborne electromagnetic system EM4H are compared. Compensation has been carried out by measuring of two dipoles for the EQUATOR and "EM4H" airborne electromagnetic systems in several modifications: with a transmitter loop attached to the fuselage of a Mi-8 helicopter, with a loop attached to the fuselage of an An-3 aircraft, and with a loop towed by a Eurocopter AS350B3. A comparison with the traditional method of compensation based on measurements of the field of three dipoles has been carried out. The signals remaining after interference compensation have been analyzed. It has been shown that the quality of compensation in the field of two dipoles is equatable to the traditional one.

Keywords: relative positioning, alternating magnetic field, transmitter, receiver, compensation, magnetic dipole.

УДК 527.62+ 519.24

ББК 30в6

DOI: 10.25728/ubs.2024.107.09

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии А.Г. Кушнером.*

Поступила в редакцию 17.10.2023.

Опубликована 31.01.2024.