

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ 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. В данной работе ставится задача определения взаимного пространственного расположения и ориентации двух объектов в электромагнитном поле. Актуальность обусловлена необходимостью повышения точности и достоверности результатов аэроэлектроразведки, особенно при наличии наведенных помех. Рассматривается метод относительного позиционирования источника и приёмника электромагнитного поля в поле двух диполей в трехмерной постановке. Реализованы два этапа: определение радиус-вектора «источник – приемник» и взаимной ориентации между ними. Приводится методика калибровки магнитных моментов источника поля, которая необходима для применения алгоритмов. Обработываются экспериментальные данные новой аэроэлектроразведочной системы. Проводится сравнение результатов, полученных для различных алгоритмов позиционирования: ГНСС-решение, двумерное электромагнитное позиционирование в поле двух диполей, трехмерное электромагнитное позиционирование в поле двух диполей. Анализируется возможность применения полученного решения для увеличения качества полученных данных, а именно, для борьбы с остаточной после стандартного метода компенсации наведенной помехой неопределенной природы. Результаты исследования показывают, что использование трехмерного электромагнитного позиционирования в поле двух диполей позволяет определить взаимное расположение объектов с точностью, не уступающей стандартному решению ГНСС, и в будущем разобраться с вопросом помех, что ведет к улучшению качества данных аэроэлектроразведки.

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

1. Введение

Необходимость определения взаимного расположения двух объектов проявляется во многих технических сферах: авиация,

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

судостроение и т.д. [7, 9, 10]. В данной работе рассмотрено практическое применение предложенных ранее алгоритмов относительного позиционирования [15] в области аэроэлектроразведки.

Аэроэлектроразведка является методом аэрогеофизической съёмки, при помощи которого исследуется распределение удельной электропроводности в верхних слоях земной коры. Во время аэроэлектроразведки оборудование устанавливается на летательном аппарате [4, 8, 18, 22]. Данный метод применяется для поиска алмазов [14, 20], воды [6, 21], золота [5, 19] и других рудных полезных ископаемых. Генерируемое источником первичное переменное магнитное поле рассматривается как поле диполя, характеристикой которого является вектор дипольного магнитного момента $\mathbf{M}$. 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 $\mathbf{R}$. Решение задачи определения взаимного расположения двух объектов состоит в вычислении радиус-вектора точки расположения одного объекта относительно другого, а также их взаимной ориентации.

Одной из важных проблем, с которой сталкиваются при обработке данных аэроэлектроразведки, является влияние поля неконтролируемых токов, возникающих в проводящих частях буксируемой конструкции и фюзеляжа летательного аппарата. Эти токи можно представить через вектор напряженности *наведенного* поля $\Delta \mathbf{H}$ с дипольным моментом его источника $\Delta \mathbf{M}$ (рис. 1). Наведенная помеха соизмерима с величиной отклика, поэтому её необходимо исключать из данных. Для этого проводится этап компенсации, суть которого заключается в перемещении системы на большую высоту (500–700 м), где можно пренебречь откликами от Земли и посмотреть на параметры наведенного поля. Регистрируемые приемником показания при таких условиях будут соответствовать наведенному полю –

квадратурной компоненте на высоте компенсации. После чего поправки вводятся в измерения поля на высоте съёмки.

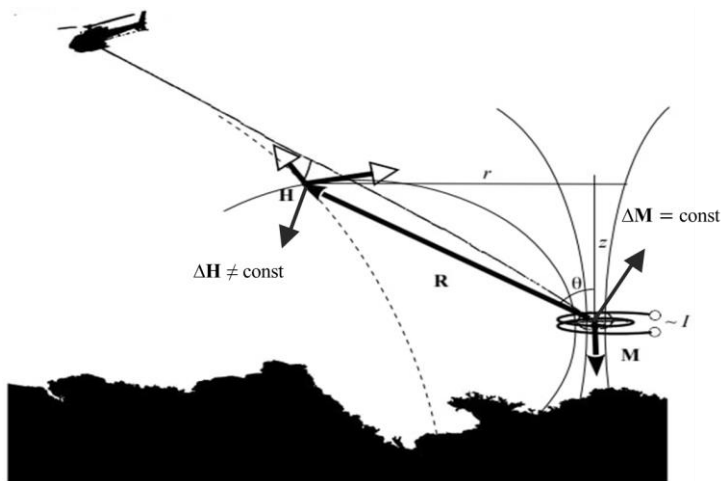


Рис. 1. Аэроэлектроразведка. $\mathbf{R}$ – радиус-вектор «источник – приемник»; $\mathbf{M}$ – вектор магнитного момента возбуждающего диполя; $\Delta\mathbf{M}$ – вектор магнитного момента наведенного поля; $\mathbf{H}$ – вектор напряженности поля возбуждающего диполя; $\Delta\mathbf{H}$ – вектор напряженности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

Существует несколько подходов к проведению этапа компенсации. Один из них основан на предположении о незначительных перемещениях приемника относительно передатчика. В этом случае можно считать, что вектор напряжённости наведённого поля постоянный в системе координат приемника. Поэтому можно просто вычесть из измерений на рабочей высоте среднее значение помехи на высоте компенсации. Этот метод называется *pulling* [16]. Иной подход – учитывать непостоянство вектора $\Delta\mathbf{H}$, анализируя взаимное пространственное и угловое расположение передатчика и приёмника [1]. Данная работа, а также предыдущие исследования связаны с последним из представленных подходов.

Ранее использовалась модель влияния наведенной помехи в форме поля точечного диполя, которая работала в течение долгого времени и на основе которой было получено удачное решение [17]. Однако в более современных системах предъявляются повышенные требования к чувствительности приемника, при этом сокращается расстояние между передатчиком и приемником [8]. Стандартная процедура компенсации в дипольном приближении оказывается недостаточной в некоторых случаях (рис. 6). Поэтому требуется учитывать составляющие в модели наведенного поля более высокого порядка, например, квадруполь. Для этого необходимо использовать высокоточное решение задачи определения взаимного расположения передатчика и приемника.

2. Постановка задачи

Аэроэлектроразведочная зондирующая установка включает в себя источник и трехкомпонентный приемник переменного магнитного поля (рис. 2).

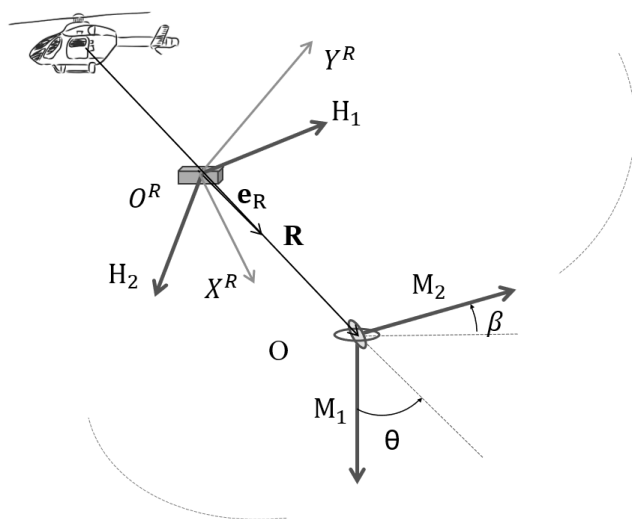


Рис. 2. Схема установки (оси Z ортогональны соответствующим парам осей X и Y)

Источником первичного поля служит система петлевых дипольных излучателей, подпитываемых переменным током на разных частотах. Плоскость основной петли расположена горизонтально, плоскость дополнительной петли расположена под углом $\eta = 90^\circ + \beta$. Значение угла β находится в интервале от 15 до 30 градусов. Вектор дипольного момента для каждой из них лежит перпендикулярно плоскости петли. Центры петель совмещены настолько это возможно для того, чтобы «совместить» магнитные диполи. Измерителем поля в случае рассматриваемой в работе системы служит трехкомпонентный векторный индукционный приемник, который находится в буксируемой гондоле. Напряженность переменного магнитного поля измеряется покомпонентно в системе координат приемника $O^R X^R Y^R Z^R$.

3. Калибровка магнитных моментов

Для применения алгоритмов определения относительного положения в пространстве по двум диполям необходимо определить величину основного и вспомогательного магнитных моментов. На рис. 3 представлен результат калибровки [12].

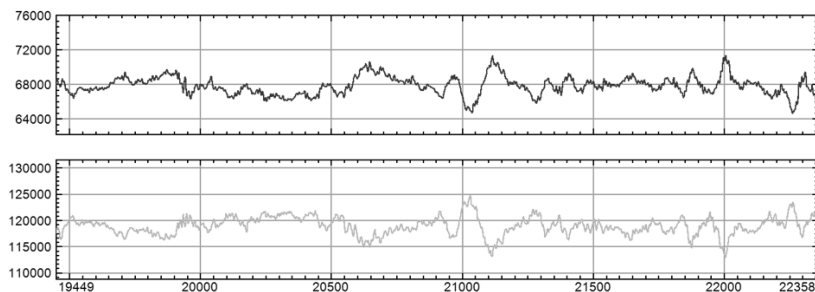


Рис. 3. Результат калибровки магнитных моментов системы (темный – основной, светлый – вспомогательный)

4. Решение задачи относительного позиционирования в пространстве

В работе [15] предложен алгоритм решения задачи электромагнитного позиционирования по полю двух диполей в трехмерной постановке. В рассматриваемом алгоритме не накладывается никаких ограничений на то, как располагаются векторы дипольных магнитных моментов. В реальности вектор вспомогательного диполя в рассматриваемой аэроэлектроразведочной установке не перпендикулярен основному, а находится к нему под тупым углом.

За основу взято соотношение для поля точечного диполя [2], записанное в матричном виде [11], [13]:

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

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

Согласно приведенному алгоритму, последовательно определяются радиус-вектор (его модуль и направление) и углы ориентации. Анализ результатов решения задачи позиционирования проводился на экспериментальных данных систем ЕМ4Н и ЭК-ВАТОР на разных носителях.

На рис. 4 представлено сравнение результатов, полученных по трёхмерному и двумерному алгоритмам относительного позиционирования, и геометрии, полученной при помощи ГНСС-измерений (глобальная навигационная спутниковая система). Также на рис. 5 показаны результаты вычисления угла тангажа передатчика.

Таким образом, вычислен полный вектор взаимного расположения передатчика и приемника – координаты и углы ориентации. Это позволяет решать задачу компенсации паразитного влияния с более сложной моделью, чем модель диполя.

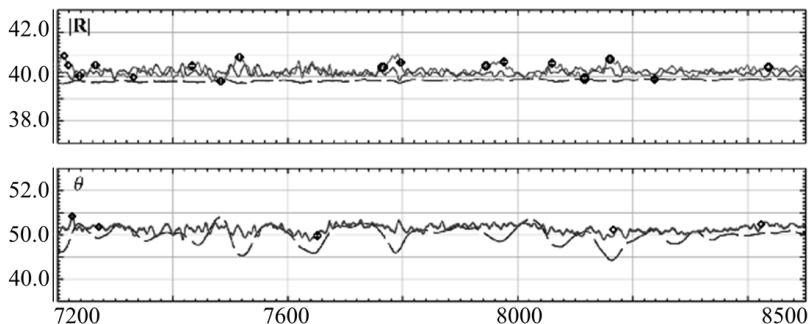


Рис. 4. Сравнение модуля радиус-вектора в метрах и угла наклона радиус-вектора, в градусах. Пунктир – ГНСС, сплошная с кругами – двумерное электромагнитное позиционирование, сплошная – трехмерное электромагнитное позиционирование

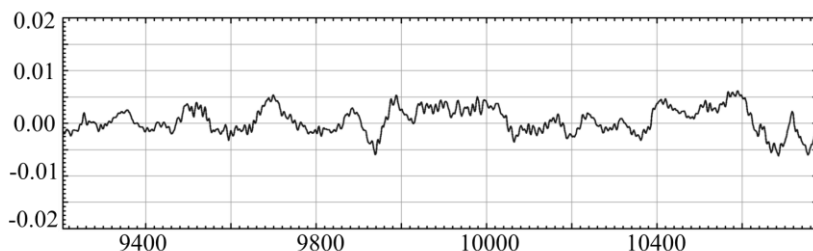


Рис. 5. Угол тангажа приемника относительно передатчика

Чувствительность приемника является величиной порядка 10^{-5} , поэтому при соблюдении точной установки (исключая систематическую ошибку) можно говорить о шумах измерения расстояния между источником и приемником, которые вычислены на порядок более точно, чем по ГНСС-решению. Вместе с тем можно заметить, что электромагнитное позиционирование дает решение, существенно отличающееся от ГНСС. Кроме того, предложенное решение позволяет вычислить углы ориентации, которые в случае применения только ГНСС решения не определяются.

5. Методы борьбы с некомпенсированной наведенной помехой

При измерении вектора напряженности поля $\mathbf{H}$ проводится процедура синхронного детектирования (когерентного накопления) в специальном цифровом вычислителе. Свертка полученного сигнала с синусом будет определять квадратурную компоненту отклика $\mathbf{H}^Q$, а с косинусом – синфазную $\mathbf{H}^I$:

$$(2) \quad \mathbf{H}^Q = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \cdot \mathbf{H}_A \cdot \sin(\omega t) dt = \text{Im}(\mathbf{H}_A e^{i\varphi}),$$

$$(3) \quad \mathbf{H}^I = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \cdot \mathbf{H}_A \cdot \cos(\omega t) dt = \text{Re}(\mathbf{H}_A e^{i\varphi}),$$

где $f(t)$ весовая функция когерентного накопления.

Сумма квадратурной и синфазной компонент задает комплексную амплитуду $\mathbf{H}_A e^{i\varphi}$:

$$(4) \quad \mathbf{H}_A e^{i\varphi} = \mathbf{H}^I + i \cdot \mathbf{H}^Q.$$

Как уже отмечалось выше, квадратурная компонента на высоте, при которой проводится этап компенсации, будет соответствовать наведенной помехе. В идеальных условиях отсутствия помех квадратурная составляющая должна быть равна нулю [3]. Существует проблема «недо-компенсации» рассматриваемой помехи, имеющей нехарактерное поведение. Это сказывается в наибольшей степени на измерениях вертикальной компоненты поля. На рис. 6 представлены измерения трех квадратурных компонент поля после процедуры компенсации (боковая, вертикальная и продольная) для вертолетной системы ЕМ4Н.

Установка ЕМ4Н [1], работающая только в частотной области, имеет буксируемую петлю источника в вертолетном варианте (рис. 1). Она представляет собой систему для определения удельной электропроводности на исследуемых площадях, подходящую для разведки полезных ископаемых, оценки ресурсов подземных вод, геологического картирования, детального изучения потенциальных полезных ископаемых. Система генери-

рует четыре синусоидальных сигнала на частотах от 130 Гц до 8 кГц.

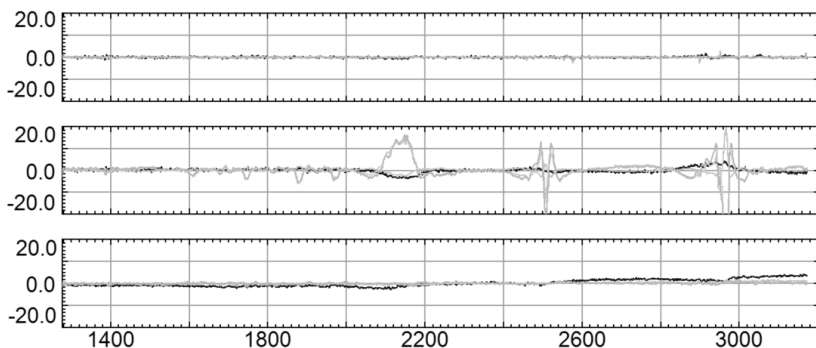


Рис. 6. Квадратурные компоненты поля после компенсации:
боковая, вертикальная и продольная (сверху вниз
соответственно)

Ставится задача, которая заключается в моделировании наведенной помехи. Результаты моделирования будут рассматриваться как поправка для измерений. Предполагается сравнить несколько подходов к моделированию помехи: рассмотреть квадрупольную модель поля, при помощи МНК подобрать параметры квадратичной формы. Для этих целей будут использоваться полученные результаты относительного позиционирования.

5.1. КВАДРУПОЛЬНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ

Все рассуждения, приводимые в работе, основываются на квазистационарной модели электромагнитного поля [2]. Рассмотрим первое уравнение Максвелла в общей постановке:

$$(5) \quad \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{d\mathbf{D}}{dt}.$$

В квазистационарной постановке в первом уравнении Максвелла пренебрегают токами смещения:

$$(6) \quad \frac{d\mathbf{D}}{dt} = 0, \mathbf{j} = 0 \rightarrow \mathbf{H} = -\nabla \varphi,$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \rightarrow \nabla \mathbf{B} = 0 = \mu_0 \nabla(-\nabla \varphi) \rightarrow \Delta \varphi = 0,$$

где $\mathbf{B}$ – индукция магнитного поля, $\mathbf{D}$ – электрическая индукция, $\mathbf{j}$ – плотность токов проводимости, ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

Рассмотрим общий вид потенциала:

$$(7) \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{R^2 + R'^2 - 2RR' \cos \theta}} = \frac{1}{R'} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{R'} \right)^n P_n \cos \theta.$$

R – радиус-вектор рассматриваемой точки пространства (приемник), R' – радиус-вектор источника поля, θ – угол между векторами. В частности, дипольному приближению соответствует первое приближение, которое содержит квадрат координаты:

$$(8) \quad \varphi_1 = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\mathbf{R}' \cdot \mathbf{d}}{R'^3},$$

$$\mathbf{H}_1 = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{3(\mathbf{R}' \cdot \mathbf{d}) - R'^2 \cdot \mathbf{d}}{R'^5}.$$

Дипольное приближение для моделирования наведенной помехи оказалось недостаточным, смотря на рис. 6. Поэтому было расписано поле квадрупольного, которое включает в себя координаты в первой и третьей степенях:

$$(9) \quad \varphi_2 = \frac{Q_{\alpha\beta}}{8\pi} \cdot \frac{\mathbf{R}'^\alpha \cdot \mathbf{R}'^\beta}{R'^5},$$

$$\mathbf{H}_2^\gamma = \frac{5}{8\pi} \cdot \frac{Q_{\alpha\beta} \cdot \mathbf{R}'^\alpha \cdot \mathbf{R}'^\beta \cdot \mathbf{R}'^\gamma}{R'^7} - \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{Q_{\gamma\beta} \cdot \mathbf{R}'^\beta}{R'^5}.$$

В дальнейшем планируется объединить дипольное и квадрупольное решение, которое будет соответствовать полной кубической форме зависимости.

5.2. РАЗЛОЖЕНИЕ НАВЕДЕННОГО ПОЛЯ ПО КОМПОНЕНТАМ РАДИУС-ВЕКТОРА

В результате решения задачи относительного позиционирования были получены компоненты радиус-вектора в системе координат передатчика. При помощи полученного вектора были разложены рассмотренные квадратурные компоненты для каждой из четырех частот. На рис. 7 представлены начальные этапы моделирования наведенного поля. Видно, что местами полученные результаты отличаются от реальных измерений, однако это имеет объяснение. Во-первых, добиться большего соответствия можно предварительной фильтрацией данных, на этом этапе для чистоты эксперимента были взяты сырые данные. Во-вторых, разложение наведенного поля через полином второй степени, коэффициенты которого подбирались МНК, является не полным и недостаточным, так как мы уже выяснили необходимость рассмотрения квадрупольной составляющей. В-третьих, планируется осуществить представление вектора наведенной помехи через полином третьей степени или же последующих степеней.

6. Заключение

- Реализован алгоритм, определяющий радиус-вектор между источником и приёмником электромагнитного поля, а также их взаимную ориентацию в трехмерном пространстве;
- Приведена методика калибровки магнитных моментов источника поля, что является необходимой частью для решения задачи относительного позиционирования;
- Определение расстояния в трехмерной постановке отличается от ГНСС и двумерного решений не более, чем на 0.5% от среднего значения исследуемой величины.
- Определение угла на гондолу в трехмерной постановке отличается от ГНСС и двумерного решений не более, чем на 2.5% от среднего значения исследуемой величины.
- Относительное позиционирование в поле двух диполей может обеспечить точность, не уступающую стандартному решению спутниковой навигационной системы.
- Результаты работы алгоритмов относительного позиционирования можно применять для компенсации наведенной по-

межи в нелинейной постановке. В перспективе стоит задача разработки методики для компенсации такой помехи.

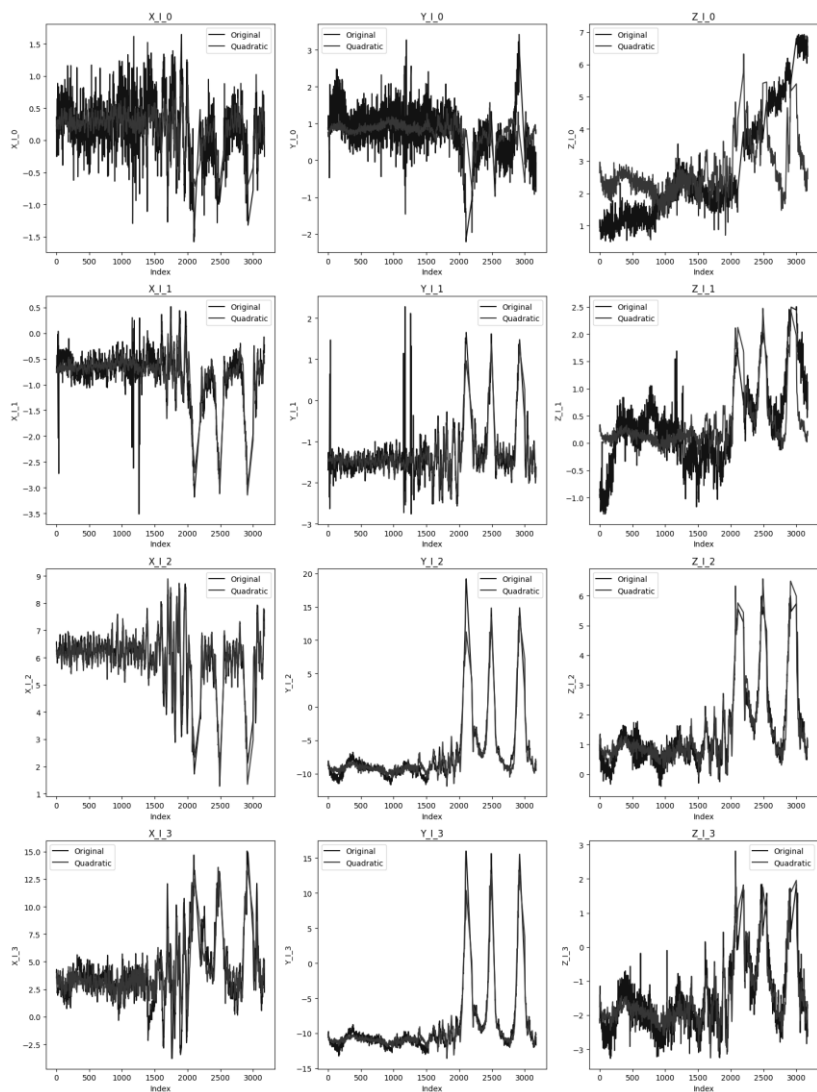


Рис. 7. Моделирование наведенной помехи при помощи разложения поля по компонентам радиус вектора. Темный – реальные данные, светлый – смоделированные данные

Литература

1. ВОЛКОВИЦКИЙ А.К., КАРШАКОВ Е.В., ПОПОВИЧ В.В. *Низкочастотная индуктивная аэроэлектроразведочная система ЕМ-4Н* // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 224–227.
2. ЖДАНОВ М.С. *Электроразведка*. Учебник для вузов. – М.: Недра, 1986. – С. 316.
3. ЖЕЛАМСКИЙ М.В. *Первая отечественная система магнитного позиционирования* // Датчики и системы. – 2009. – №1. – С. 2–7.
4. *Инструкция по электроразведке: наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахто-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка* // Под ред. Л.А. Рейхерт. – Л.: Недра, 1984. – С. 352.
5. 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.
6. КОЗАК С.З., АГЕЕВ В.В., МОЙЛАНЕН Е.В. и др. *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.
7. КОЛЕСНИКОВ М.П., МАРТЫНОВА Л.А., ПАШКЕВИЧ И.В. и др. *Метод позиционирования автономного необитаемого подводного аппарата в процессе приведения к причальному устройству* // Изв. Тул. гос. ун-та. Технические науки. – 2015. – №11. – С. 38–48.
8. МОЙЛАНЕН Е.В. *Современные методы аэроэлектроразведки* // Физика Земли. – 2022. – Т. 68, №5. – С. 171–180
9. НЕБЫЛОВ А.В., ПЕРЛЮК В.В., ЛЕОНТЬЕВА Т.С. *Исследование технологии взаимной навигации и ориентации малых космических аппаратов в группе* // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т. 18, №1. – С. 88–93.

10. ОБОЛЕНСКИЙ Ю.Г., ПОХВАЛЕНСКИЙ В.Л., ЧЕГЛАКОВ Д.И. *Алгоритм автоматического управления летательным аппаратом при дозаправке топливом в воздухе* // Труды МАИ. – 2013. – №65. – С. 1–17.
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. ТРЕТЬЯКОВА Е.А. *Решение задачи относительного позиционирования в электромагнитном поле двух диполей* // Труды 19-ой Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2023, Воронеж). – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2023. – С. 401–407.
13. ТХОРЕНКО М.Ю., КАРШАКОВ Е.В., ПАВЛОВ Б.В. и др. *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. и др. *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. – P. 301–312.
17. KARSHAKOV E.V., TRETYAKOVA E.A., KAPLUN D.V. *Analysis of the self-interference model and compensation methods in airborne electromagnetics* // Short abstracts of the 8th Workshop on Airborne Electromagnetics (AEM 2023, Fitzroy Island). Fitzroy Island: Australian Society of Exploration Geophysicists. – 2023. – Vol. 2023 (2). – P. 97–100 (1–4).

18. LEGAULT J.M. *Airborne Electromagnetic Systems – State of the Art and Future Directions* // CSEG Recorder. – 2015. – Vol. 40, No. 6. – P. 38–49.
19. LEGAULT J.M., KWAN K., GREIG J. et al. *Targeting epithermal Au-Ag using helicopter TDEM, magnetic, and radio-metric data at Lawyers Project, North-Central BC, Canada* // Proc. of the 8th Int. Airborne Electromagnetics Workshop, (AEM–2023). – P. 1-6.
20. PERSOVA M.G., SOLOVEICHNIK Y.G., TRIGUBOVICH G.M. 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. – Art. 104611.
21. RUTHERFORD J., IBRAHIMI T., MUNDAY T. 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):1288. – P. 1-30.
22. TELFORD W.M., GELDART L.R. AND SHERIF R.E. *Applied Geophysics*. – Cambridge University Press. – 2004. – P. 744.

EXPERIENCE OF APPLYING RELATIVE POSITIONING ALGORITHMS IN THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF TWO DIPOLES

Ekaterina Tretiakova, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Graduate 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, determining the mutual spatial location and orientation of two objects in an electromagnetic field problem is set. The relevance is due to the need to improve the accuracy and reliability of the airborne electrical exploration results, especially in the presence of induced interference. The method of electromagnetic field source and receiver relative positioning in the field of two dipoles in a three-dimensional formulation is considered. Two stages are implemented: determining the source-receiver radius

vector and their mutual orientation. A technique for calibrating the field source magnetic moments, which is necessary for applying the algorithms, is given. Experimental data of a new airborne electrical exploration system were processed. The results obtained for different positioning algorithms are compared: GNSS solution, two-dimensional electromagnetic positioning in the field of two dipoles, three-dimensional electromagnetic positioning in the field of two dipoles. The possibility of using the obtained solution to improve the quality of the obtained data is analyzed, namely, to control the uncertain nature residual induced interference after the standard compensation method. The study results show that the use of three-dimensional electromagnetic positioning in the two dipoles field allows determining the objects relative position with an accuracy not inferior to the standard GNSS solution, and in the future to deal with the issue of interference, which leads to an improvement in the quality of airborne electrical exploration data.

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

УДК 527.62+ 519.24

ББК 30в6

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Б.Р. Андриевским.*

*Поступила в редакцию 11.11.2024.
Опубликована 31.03.2025.*