

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ДВУХ ДИПОЛЕЙ

А.К. Волковицкий

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: avolkovitsky@yandex.ru

Е.А. Третьякова

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: ekaterina_tretikova@mail.ru

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

Аннотация: Определение взаимного пространственного расположения и ориентации двух объектов является актуальной задачей. В данной работе рассмотрен метод относительного позиционирования источника и приёмника электромагнитного поля в поле двух диполей в трехмерной постановке. Реализованы два этапа: определение радиус-вектора источник-приемник и их взаимной ориентации. Проведено сравнение результатов, полученных при обработке экспериментальных данных аэроэлектроразведочной системы.

1. Введение

Необходимость определения взаимного расположения двух объектов проявляется во многих технических сферах: авиация, судостроение и т.д. [3, 5, 6]. В данной работе рассмотрено практическое применение предложенных ранее алгоритмов относительного позиционирования [10] в области аэроэлектроразведки.

Аэроэлектроразведка является методом аэрогеофизической съёмки, при помощи которого исследуется распределение удельной электропроводности. Оборудование устанавливается на летательном аппарате [2, 12, 13]. 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 взаимную ориентацию.

Одна из важных проблем, возникающих при обработке данных аэроэлектроразведки, - влияние поля неконтролируемых токов, возникающих в проводящих частях буксируемой конструкции и фюзеляжа летательного аппарата. Ранее использовалась модель такого влияния в форме поля диполя, и было получено удачное решение [11]. Но в более современных системах предъявляются повышенные требования к чувствительности приемника, при этом сокращается расстояние между передатчиком и приемником [4]. Поэтому требуется учитывать составляющие модели более высокого порядка, например, квадруполь. Чтобы была возможность применять такие модели для компенсации, нужно 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. 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 $\eta = 90^\circ + \beta$ к основной. Вектор дипольного момента для каждой из них лежит перпендикулярно плоскости. Центры петель совмещены насколько 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 $O^R X^R Y^R Z^R$ (рис. 1).

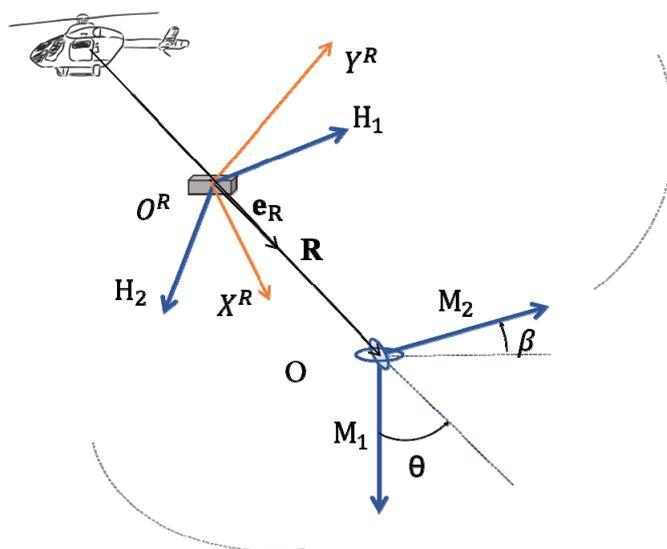


Рис. 1. Схема установки (оси Z ортогональны соответствующим парам осей X и Y).

3. Определение взаимного расположения

3.1. Калибровка магнитных моментов

Для применения алгоритмов определения относительного положения в пространстве по двум диполям необходимо определить величину основного и вспомогательного магнитных моментов. На рис. 2 представлен результат калибровки [8].

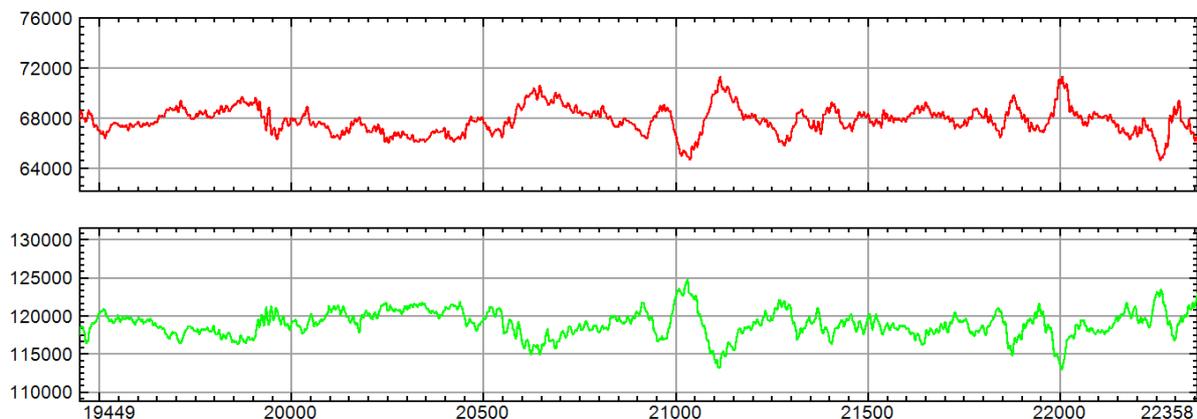


Рис. 2. Результат калибровки магнитных моментов системы (красный – основной, зелёный – вспомогательный).

3.2. Решение задачи относительного позиционирования в пространстве

В работе [10] предложен алгоритм решения задачи электромагнитного позиционирования по полю двух диполей в трехмерной постановке. При этом 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 [1], записанное в матричном виде [7, 9]:

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

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

Согласно данному алгоритму, последовательно определяются радиус-вектор (его модуль и направление) и углы ориентации. На рис. 3 и рис. 4 представлено сравнение результатов, полученных по трёхмерному алгоритму относительного позиционирования, и геометрии, полученной при помощи ГНСС измерений (глобальная навигационная спутниковая система). Также на рис. 5 показаны результаты вычисления угла тангажа передатчика.

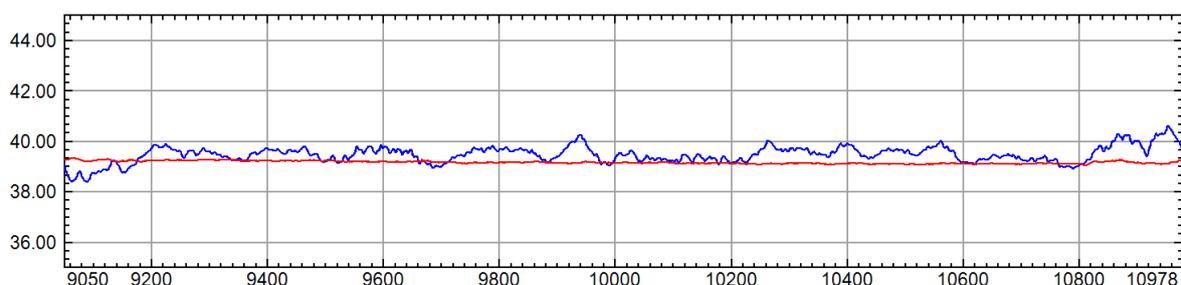


Рис. 3. Сравнение модуля радиус-вектора в метрах (синий – электромагнитное позиционирование, красный – по GPS)

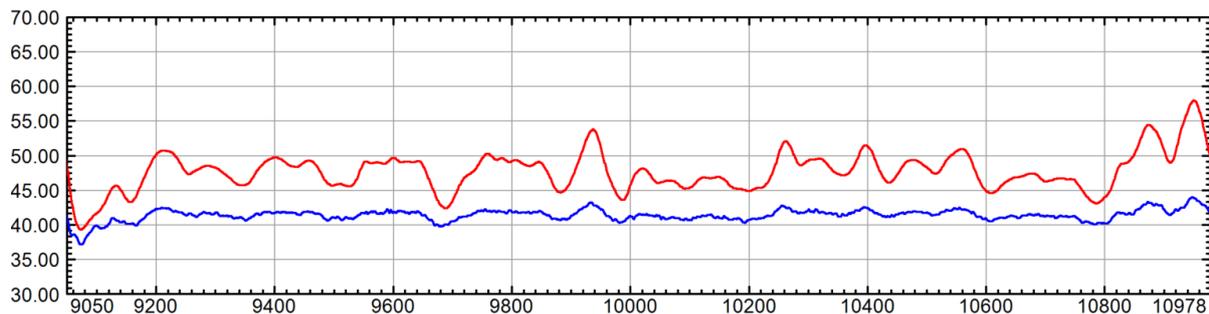


Рис. 4. Сравнение угла наклона радиус-вектора, в градусах (синий – электромагнитное позиционирование, красный – по ГНСС).

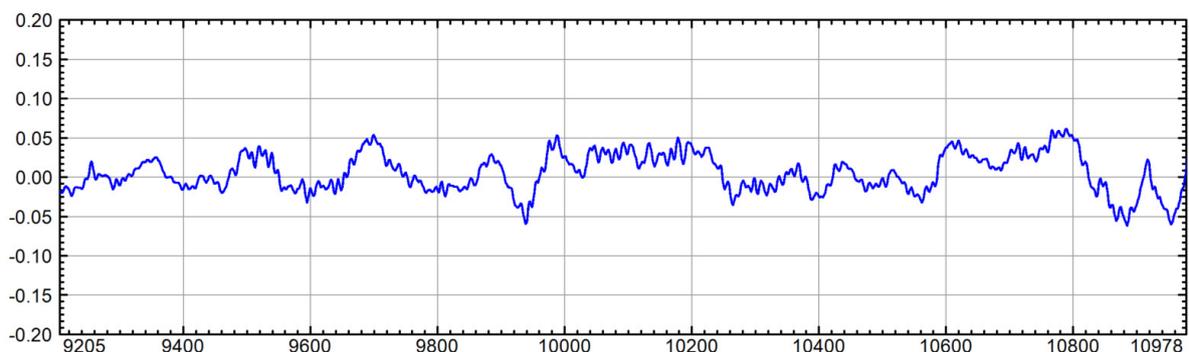


Рис. 5. Угол тангажа приемника относительно передатчика.

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.

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. Дополнительно можно видеть, что электромагнитное позиционирование дает существенно отличающееся решение по сравнению с ГНСС (рис. 3, 4), плюс позволяет вычислить углы ориентации (рис 5), которые в случае применения только ГНСС не определяются.

4. Заключение

- Проведена калибровка магнитных моментов источника поля, что является необходимой частью для решения задачи относительного позиционирования;
- Реализован алгоритм, определяющий радиус-вектор между источником и приёмником электромагнитного поля, а также их взаимную ориентацию в трехмерном пространстве;
- Решение в трехмерной постановке отличается от ГНСС решения не более, чем на 5% от среднего значения исследуемой величины. Относительное позиционирование в трехмерной постановке может обеспечить точность, не уступающую решению спутниковой навигационной системы.

Список литературы

1. Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра. 1986. 316 с.
2. Инструкция по электроразведке: наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахто-рудничная электроразведка, аэроразведка, морская электроразведка // Ред.: Л.А. Рейхерт. Л.: Недра, 1984. 352 с.
3. Колесников М.П., Мартынова Л.А., Пашкевич И.В., Шелест П.С. Метод позиционирования автономного необитаемого подводного аппарата в процессе приведения к причальному устройству // Изв. Тул. гос. ун-та. Технические науки. 2015. Вып. 11. Ч. 2. С. 38-48.
4. Мойланен Е.В. Современные методы аэроразведки // Физика Земли. 2022. Т. 68, № 5. С. 171-180.
5. 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.
6. Оболенский Ю.Г., Похваленский В.Л., Чеглаков Д.И. Алгоритм автоматического управления летательным аппаратом при дозаправке топливом в воздухе // Труды МАИ. 2013. Выпуск № 65. С. 1-17.
7. Павлов Б.В., Волковицкий А.К., Каршаков Е.В. Низкочастотная электромагнитная система относительной навигации и ориентации // Гирскопия и навигация. 2010. С. 3-15.
8. Третьякова Е.А. Решение задачи относительного позиционирования в электромагнитном поле двух диполей / Труды 19-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2023, Воронеж). Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2023. С. 401-407.
9. 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.
10. 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.
11. 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. 2. P. 97-100.
12. Legault, J.M. Airborne Electromagnetic Systems – State of the Art and Future Directions // CSEG Recorder. 2015. Vol. 40, No. 6. P. 38-49
13. Telford W.M., Geldart L.R. and Sherif R.E. Applied Geophysics. Cambridge University Press. 2004. 744 p.