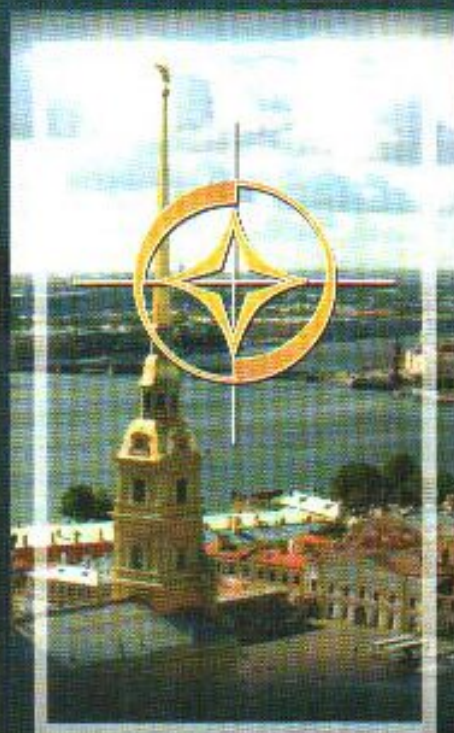


ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
• ЭЛЕКТРОПРИБОР •

XVI САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИНТЕГРИРОВАННЫМ НАВИГАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ



25-27 мая 2009 г.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, РОССИЯ

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:

- НАУЧНОГО СОВЕТА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И НАВИГАЦИИ
- РОССИЙСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (РФФИ)
- МЕЖДУНАРОДНОЙ ОБЩЕСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ
«АКАДЕМИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ» (АНУД)
- АМЕРИКАНСКОГО ИНСТИТУТА АЭРОНАВТИКИ И АСТРОНАВТИКИ (АИАА)
- ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРОВ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ (IEEE), США
- АССОЦИАЦИИ АСТРОНАВТИКИ И АЭРОНАВТИКИ ФРАНЦИИ (АААФ)
- ФРАНЦУЗСКОГО ИНСТИТУТА НАВИГАЦИИ (IFN)
- НЕМЕЦКОГО ИНСТИТУТА НАВИГАЦИИ (DGON)

НИЗКОЧАСТОТНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ

Б.В. Павлов¹, А.К. Волковицкий², Е.В. Каршаков³

ИПУ РАН, Москва, Профсоюзная, 65

E-mail: karshak@mail.ru

Аннотация

Ключевые слова: относительная навигация, ориентация, магнитный диполь, переменное магнитное поле, аэроразведка

Предлагается метод определения взаимного расположения двух подвижных объектов, в основе которого лежат измерения параметров переменного магнитного поля трехкомпонентным индукционным датчиком (приемником), установленным на одном из объектов. Поле возбуждается переменным током в петлях, смонтированных на втором объекте. Магнитные моменты, создаваемые петлями, образуют систему линейно независимых векторов. Идея метода заключается в определении параметров возбуждающих моментов как параметров точечных диполей в системе координат, связанной с осями чувствительности приемника. Описана реализация метода применительно к низкочастотной индуктивной аэроразведочной системе. В качестве одного из подвижных объектов выступает самолет или вертолет-носитель, в качестве второго — выпускная гондола с установленным в ней индукционным датчиком. Рассмотрены варианты с тремя и с двумя источниками поля. Приведены результаты летных испытаний.

Введение

Интенсивное развитие аэрогеофизических методов напрямую связано с применением новых технологий для навигационного обеспечения аэросъемочных работ. Наиболее яркий пример — качественный скачок, произошедший в аэрогравиметрии с применением глубокого комплексирования инерциальных и спутниковых навигационных систем, благодаря работам лаборатории управления и навигации МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством Н.А. Парусникова [1].

Способ решения навигационной задачи, рассмотренный авторами, возник в связи с другим аэрогеофизическим методом — электроразведкой. В аэроразведке традиционно применяется переменное низкочастотное (сотни герц) электромагнитное поле. Для возбуждения и измерения поля обычно используются индуктивными методами.

За более чем 60-летнюю историю метода появился целый ряд модификаций аэроразведочных систем [2]. При этом их все условно можно разделить на две группы. К первой группе относятся системы, в которых генератор поля и приемник жестко связаны. Ко второй относятся системы с переменной базой. Среди преимуществ первой группы следует выделить небольшие физические размеры, неизменность параметров первичного поля в осях приемника. К недостаткам можно отнести необходимость компенсации первичного поля в точке расположения приемника, поскольку его величина на 5-7 порядков больше поля отклика, несущего информацию о распределении проводимости в слагающих землю породах. В системах второй группы увеличивая базу можно уменьшить влияние первичного поля. Главный недостаток систем с переменной базой — изменяющееся поле при изменении взаимного расположения передатчика и приемника.

В России наиболее широко используется аэроразведочная система ЕМ-4Н, устанавливаемая на самолетах Ан-2, Ан-3 и вертолетах Ми-8 [3,4], которая представляет собой модификацию аппаратуры для метода дипольного индуктивного профилирования в аэроварианте (ДИП-А) [5]. Эта система является характерным представителем второй группы. Система реализована следующим образом (Рис. 1).

На борту летательного аппарата, самолета или вертолета, жестко крепится к фюзеляжу многовитковая петля. В петле возбуждается переменный ток, представляющий собой сумму синусоидальных сигналов на четырех рабочих частотах. Приемник помещается в гондолу, которая буксируется тем же носителем на гибком тросе длиной около 70 метров. Каждая из трех осей чувствительности приемника образована парой индукционных катушек. Все три пары монтируются на сторонах куба таким образом, чтобы центры чувствительности по осям находились в одной точке (Рис. 2). Вдоль каждой оси чувствительности измеряются амплитуда и смещение фазы сигналов на каждой из рабочих частот.

Современные методы обработки и интерпретации данных аэроразведки требуют выделения полного отклика, т.е. и квадратурной, и синфазной его компоненты [6,7]. Таким образом, основная задача

¹ Доктор технических наук, г.н.с.

² Вед. инженер

³ Кандидат физико-математических наук, вед. инженер

в аэроэлектроразведочной системе — измерение поля отклика, для чего необходимо:

- 1) рассчитать поле возбуждения в точке расположения приемника и отделить его от синфазной компоненты отклика;
- 2) исключить влияние изменения высоты над землей передатчика и приемника;

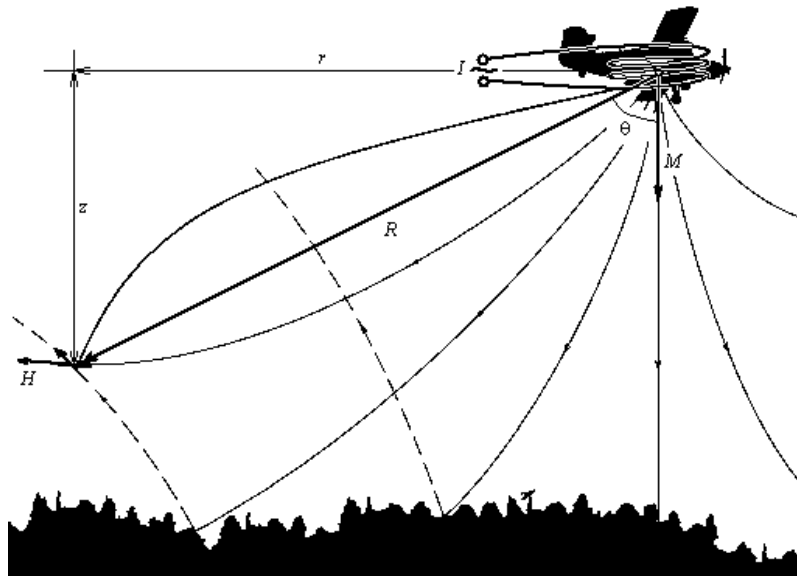


Рис. 1. Аэроэлектроразведка

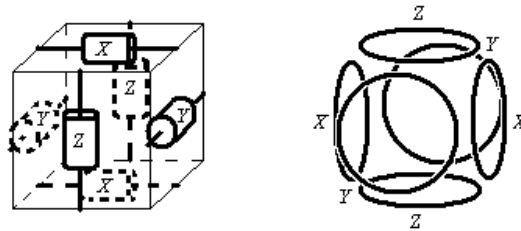


Рис. 2. Схема приемника системы EM-4H (слева) и системы GEOTEM (справа).

Чтобы удовлетворить требуемым характеристикам системы по измерению отклика, необходимо обеспечить точность определения углов взаимной ориентации передатчика и приемника — в пределах одного градуса. Точность определения расстояния между передатчиком и приемником, необходимая для интерпретации, в зависимости от условий съемки должна составлять от 10 до 50 см. Электроразведка рассчитана на поиск проводящих объектов, но именно с ростом проводимости пород точность решения навигационной задачи начинает играть решающее значение [8].

Первый, рассмотренный авторами, вариант определения взаимного расположения — использование средств спутниковой и инерциальной навигации. Для этого на борту носителя и в гондole требуется установить спутниковые навигационные системы, а также инерциальные блоки, определяющие параметры взаимной ориентации передатчика и приемника. Недостатком этого подхода является необходимость серьезной конструктивной доработки приемника и гондолы.

Кроме того, проведенные исследования показали, что такая система не может обеспечить точность определения расстояния, сопоставимую с точностью измерения поля. Дело в том, что поле петли с током, эквивалентное при заданных геометрических параметрах полю точечного магнитного диполя с магнитным моментом M , $|M| = ISn$, где I — величина тока, S — площадь петли, n — количество витков, определяется следующими соотношениями [9]:

$$H_r = 3 |M| \cos \theta \sin \theta / 4\pi R^3, \quad H_\phi = 0, \quad H_z = |M| (3 \cos^2 \theta - 1) / 4\pi R^3. \quad (1)$$

Это выражение для компонент вектора напряженности магнитного поля в цилиндрической системе координат в точке (r, ϕ, z) , ось z направлена вдоль направления вектора момента M , начало координат в точке расположения диполя, $\theta = \arctg r/z$, $R^2 = r^2 + z^2$ (Рис. 1). Здесь и далее магнитная проницаемость воздуха полагается равной магнитной проницаемости вакуума, что вполне допустимо при существующих точностях индукционных датчиков. Из выражения (1) видно, что H зависит от расстояния как $1/|R|^3$,

поэтому

$$H(|R| + \Delta R) = H(|R|) + \Delta H, \quad \Delta H \sim 3 \Delta R/|R|.$$

Например, для системы ЕМ-4Н $|R| \sim 70$ м, поэтому ошибка определения расстояния в 1 см приводит к погрешности счисления поля возбуждения $\sim 4 \cdot 10^{-4}$, тогда как точность измерений самого поля достигает $1 \cdot 10^{-4}$. Обеспечить же привязку центра возбуждения петли площадью 40 - 60 м² даже с сантиметровой точностью представляется задачей невыполнимой.

Второй подход предложен Ричардом Смитом [10] и используется для систем GEOTEM, MEGATEM, TEMPEST, компания «Fugro Airborne» (Канада). Все перечисленные системы с точки зрения геометрии установки являются прямыми аналогами Российской системы ЕМ-4Н. Гондола с приемником, показанным на Рисунке 2, выпускается на длину ~ 120 м. Приемником измеряется время затухания поля токов, возбужденных в Земле коротким импульсом тока в петле, установленной на самолете-носителе. Этот метод электроразведки носит название метода переходных процессов.

Суть подхода, использованного для решения навигационной задачи заключается в следующем. Предположим, что поле возбуждения есть поле точечного магнитного диполя. Тогда компоненты поля в любой точке в системе координат, связанной с диполем, выражаются соотношениями (1). При заданной величине момента диполя из этих соотношений можно определить параметры R , θ , при условии, что компоненты векторов M и H определены в одной и той же системе координат.

Преимущества такого подхода очевидны. Здесь определяется положение приемника относительно центра возбуждения петли, а именно эти параметры необходимы для интерпретации. Недостаток — отсутствие информации об ориентации осей приемника относительно вектора M . Если для определения ориентации передатчика в системах типа GEOTEM пользуются курсовертикалью, установленной на борту самолета-носителя, то для определения ориентации приемника способ измерения пока не найден. На данном этапе в системах типа GEOTEM вводится предположение о стабильности осей чувствительности приемника. В следствие этого появляется необходимость осреднения показаний приемника для исключения влияния эволюций приемных рамок, что негативно сказывается на пространственном разрешении метода.

Итак, актуальность задачи определения взаимного расположения передатчика и приемника в аэроэлектроразведке очевидна. Измерение навигационных параметров с точностью, отвечающей точности измерения компонент переменного магнитного поля, позволит исключить недостатки системы, связанные с нежестким креплением приемника, сохранив при этом чувствительность, на данный момент недостижимую для систем с жесткой базой.

В данной работе изложен следующий метод решения описанной навигационной задачи. Предлагается использовать измерения параметров поля, возбуждаемого в двух или трех петлях, смонтированных на фюзеляже летательного аппарата. При этом важно, чтобы магнитные моменты, создаваемые петлями, образовывали систему линейно независимых векторов.

Система трех диполей

Соотношения (1) для компонент поля магнитного диполя можно переписать в более удобном, векторном виде в произвольной декартовой системе координат:

$$H = (3 e_R e_R^T - E) M / 4\pi |R|^3 = \Omega(R) M. \quad (2)$$

Здесь R — радиус-вектор передатчик-приемник, e_R — единичный вектор, направленный вдоль R , M — вектор магнитного момента возбуждающего диполя, $e_R e_R^T$ — диадное произведение, т.е. матрица, составленная из попарных произведений компонент вектора e_R . Из соотношения (2) видно, что связь между полем и моментом диполя определена матрицей $\Omega(R)$, которая зависит только от радиуса-вектора R .

Среди свойств матрицы $\Omega(R)$ наиболее важными являются следующие. Во-первых, матрица $\Omega(R)$ является невырожденной везде, где она определена, т.е. кроме точки $R = 0$. Следовательно, везде существует матрица

$$\Theta(R) = [\Omega(R)]^{-1} = (3 e_R e_R^T - 2E) \cdot 2\pi |R|^3, \quad M = \Theta(R) H. \quad (3)$$

Во-вторых, при фиксированном направлении e_R с изменением расстояния меняется только модуль вектора H как $1/|R|^3$. Очевидно, аналогичным свойством обладает обратная матрица (3).

Допустим, что амплитуда возбуждающего диполя $|M|$ известна. Если в какой-то системе координат измерены компоненты вектора H , тогда для каждого направления e_R существует единственная точка, в которой можно поместить возбуждающий диполь, обеспечивающий полученное значение поля. Направление вектора момента при этом однозначно задается соотношением (3). Расстояние до этой точки определяется следующим образом:

$$R = (|M| / (3 e_R e_R^T - 2E) \cdot 2\pi H)^{1/3}. \quad (4)$$

Соотношение (4) задает замкнутую, выпуклую, центрально симметричную поверхность Σ , являющуюся геометрическим местом точек возможных положений диполя. Эта поверхность близка к поверхности эллипсоида с главными осями, пропорциональными, соответственно $2^{1/3}$, 1, 1, и является поверхностью вращения вокруг направления вектора H (Рис. 3).

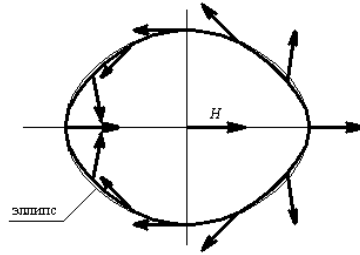


Рис. 3. Геометрическое место точек возможного положения диполя M

Следует отметить, что в случае периодического возбуждения $M \cos \omega t$ соотношения (1)-(4) выполняются для амплитуд магнитного момента и напряженности магнитного поля.

Рассмотрим теперь пару диполей, расположенных в одной точке, векторы момента которых M_1, M_2 имеют существенно различные направления. Получить такую пару можно, совместив геометрические центры петель, установленных в разных плоскостях. Если мы имеем дело с электроразведочными системами, реализующими метод переходных процессов, т.е. работающими с сигналами во временной области, такими, как GEOTEM, возбуждаемые в разных петлях сигналы должны быть разнесены по времени. Для систем, таких как EM-4Н, работающих в частотной области, в разных петлях должны быть разные спектры возбуждаемых сигналов. Это позволит различать векторы поля двух диполей в точке приема.

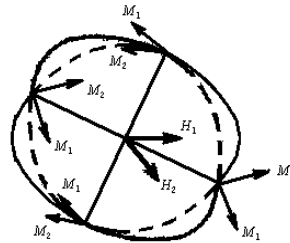


Рис. 4. Пересечение двух поверхностей

Полагая амплитуды моментов возбуждения известными, можно получить две поверхности, линия пересечения которых задает геометрическое место точек возможного расположения диполей (Рис. 4). Поверхность третьего диполя, вектор момента M_3 которого составляет линейно независимую комбинацию с векторами M_1, M_2 , в наиболее общем случае дает восемь точек пересечения.

Рассмотрим частный случай. Пусть векторы M_1, M_2, M_3 образуют правую тройку векторов. Допустим, приемник располагается в точке S внутри октанта I, образованного положительными направлениями моментов диполей. Для векторов H_1, H_2, H_3 получим восемь точек O_1, O_2, \dots, O_8 , в каждой из которых однозначно задается тройка векторов моментов (Рис. 5). Однако, только для точки O_1 точка S попадает в октант I.

Благодаря линейности выражений (2), (3) в качестве опорной тройки векторов можно выбирать не только векторы моментов диполей, но и любую их линейную комбинацию. Таким образом, любая конфигурация системы диполей может быть сведена к рассмотренному выше случаю.

Для работы описанного алгоритма необходима оценка значений моментов возбуждения. Для этого осуществляется измерение тока в петлях возбуждения, а геометрические параметры петель оцениваются на этапе начальной калибровки системы.

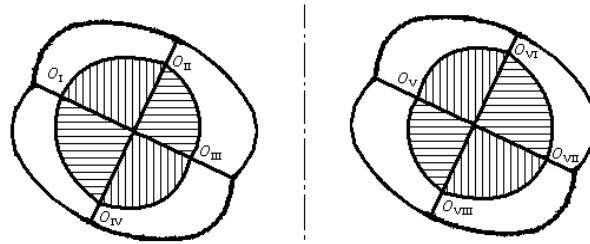


Рис. 5. Пересечение трех поверхностей, вид сверху и снизу.

Использование угловой информации

Описанный выше метод на практике оказывается не удобным. Наличие погрешностей начальной калибровки существенным образом сказывается на амплитудных соотношениях сигналов в системе. Так же влияет нестабильность геометрических параметров петель [8]. В то же время, все перечисленные факторы в значительно меньшей степени влияют на соотношение углов. Учитывая, каким образом в выражениях (2), (3) связаны амплитуда поля и расстояние, можно сначала определить направляющие косинусы радиус-вектора, а его длину рассчитывать с использованием только одного из векторов H , того, который будет использоваться в обработке электроразведочных данных. Для решения задачи в такой постановке используется информация об углах между векторами моментов.

Рассмотрим, для начала, плоский случай. Пусть в точке O расположены два взаимно ортогональных диполя, а приемник S находится в плоскости, образуемой векторами моментов M_1, M_2 . Угол α между векторами H_1, H_2 связан с углом θ , отсчитанным от вектора M_1 до радиус-вектора R следующим соотношением:

$$3 \sin 2\theta = 4 \operatorname{ctg} \alpha, \quad (5)$$

которое легко получить из выражений (1) для компонент поля диполя.

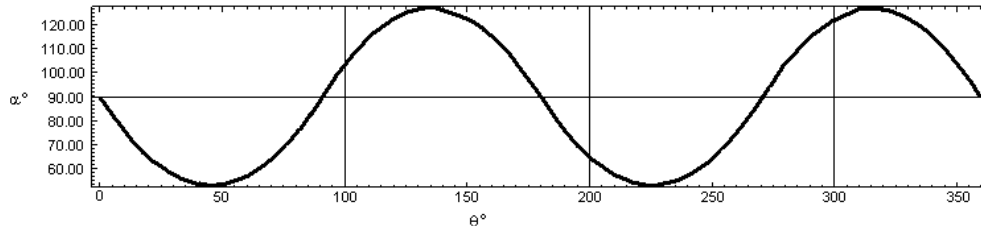


Рис. 6. График функции $\alpha(\theta)$.

Анализируя зависимость (5), легко прийти к выводу, что угол θ наилучшим образом определяется в окрестности $\pi/2$, и наихудшим — в окрестности $\pi/4 + \pi n/2$, $n = 0, 1, 2, 3$ (Рис. 6). Каким бы образом система диполей не была сориентирована по отношению к приемнику, зная поле диполей с моментами M_1, M_2 можно рассчитать поле диполей

$$\begin{aligned} M_1' &= M_1 \cos \varphi - M_2 \sin \varphi, & M_2' &= M_1 \sin \varphi + M_2 \cos \varphi \Rightarrow \\ H_1' &= H_1 \cos \varphi - H_2 \sin \varphi, & H_2' &= H_1 \sin \varphi + H_2 \cos \varphi \end{aligned}$$

для любого угла φ , в том числе для угла, при котором направление вектора M_1' совпадает с направлением радиус-вектора R . Такой метод расчета в плоскости вполне применим в случае, когда нет возможности установить три возбуждающих диполя. Он не позволяет оценить боковое смещение приемника, однако в задаче аэроразведки такие смещения практически не приводят к искажению поля отклика.

Пусть теперь задана система трех ортогональных диполей M_1, M_2, M_3 таким образом, что вектор M_1 направлен в сторону приемника. Можно подобрать угол ψ , при котором вектор H_3' ортогонален паре векторов H_1, H_2' :

$$H_2' = H_2 \cos \psi - H_3 \sin \psi, \quad H_3' = H_2 \sin \psi + H_3 \cos \psi \Rightarrow H_3'^T H_1 = H_3'^T H_2' = 0.$$

В этом случае точка приема лежит в плоскости векторов M_1, M_2' и задача сводится к двумерной. Далее, пользуясь формулой (4), можно определить расстояния до центра основного диполя.

Для решения задачи в такой постановке в процессе начальной калибровки оцениваются углы между векторами моментов диполей возбуждения, а так же момент основного диполя M_1 .

Результаты летных испытаний

Описанный метод решения навигационной задачи легко реализуем на базе аэроэлектроразведочной системы ЕМ-4Н, поскольку использованный в ней принцип компенсации влияния поляризации летательного аппарата (ЛА) уже предполагает наличие дополнительных диполей [11]: вектор поля, возникший благодаря проводящим элементам фюзеляжа ЛА, жестко связан с корпусом и представляется линейной комбинацией возбуждаемых диполей. В случае самолетов Ан-2, Ан-3 магнитный момент основного диполя направлен вертикально вниз, а вектор момента единственного дополнительного диполя направлен вдоль фюзеляжа. Моменты возбуждения ортогональны (Рис. 7). В случае вертолета Ми-8 два дополнительных диполя, векторы моментов которых лежат в горизонтальной плоскости, монтируются симметрично относительно продольной оси вертолета. Каждый дополнительный диполь образуется парой соленоидальных петель (Рис. 8). Можно получить ортогональную тройку опорных векторов, взяв сумму и разность сигналов дополнительных диполей.

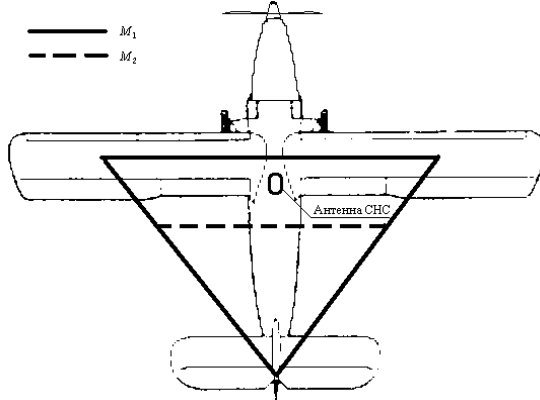


Рис. 7. Схема установки петлей на самолеты Ан-3, Ан-2.

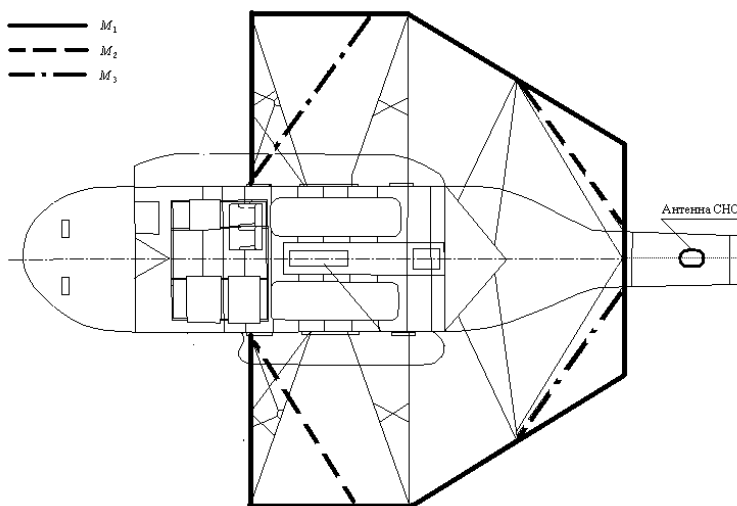


Рис. 8. Схема установки петлей на вертолет Ми-8.

Для анализа точности метода и для начальной калибровки использовалось навигационное решение, полученное при помощи спутниковой навигационной системы (СНС), работающей в относительном дифференциальном режиме. Один приемник СНС устанавливался на борту ЛА, второй — в гондole (Рис. 9). Оба использованных приемника измеряли сигналы частоты L1 спутников системы GPS.

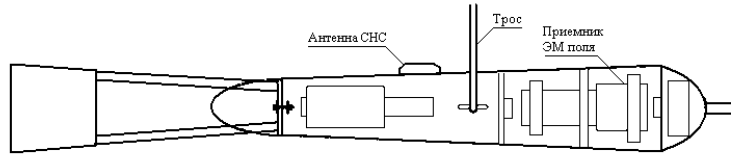


Рис. 9. Гондола.

На Рисунке 10 представлены результаты испытаний системы на вертолете Ми-8. Для наилучшей оценки возможностей метода в хвостовое оперение гондолы был внесен дестабилизирующий элемент, который привел к постоянным угловым эволюциям гондолы с периодом около четырех секунд. Для всех графиков здесь и далее по оси x отложено расстояние вдоль линии пути ЛА.

На верхнем графике показаны результаты измерения расстояния в метрах тремя методами: R_{GPS} — дифференциальный режим СНС, R_{EM} — электромагнитный метод, использующий три диполя, R_{Sm} — электромагнитный метод, предложенный Ричардом Смитом для систем типа GEOTEM, с использованием одного диполя [10]. Рассогласование R_{EM} и R_{Sm} обусловлено эволюциями осей приемника относительно возбуждающих диполей.

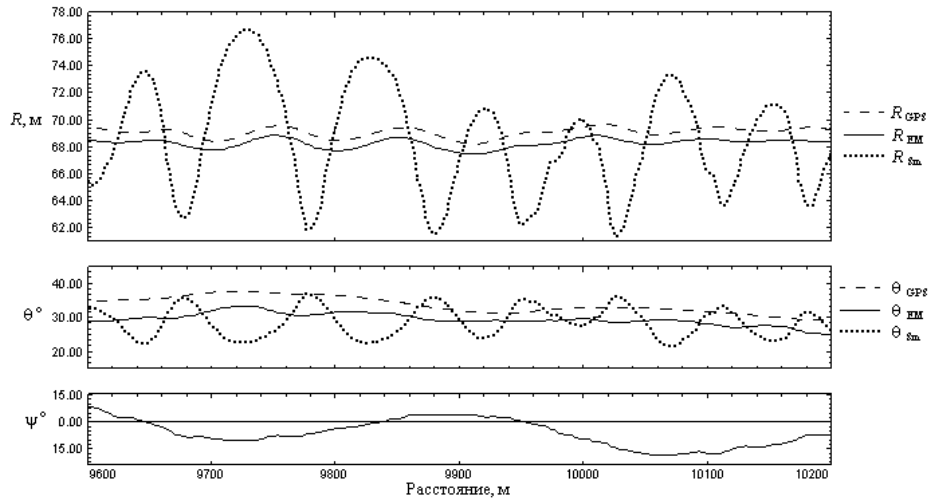


Рис. 10. Измерения расстояния и углов для вертолета Ми-8.

Средний график отображает результаты измерения угла в вертикальной плоскости: θ_{GPS} — угол между радиус-вектором R и местной вертикалью, измеренный СНС в дифференциальном режиме, θ_{EM} — угол между радиус-вектором R и вектором момента M_1 , измеренный методом, использующим три диполя, θ_{Sm} — угол между радиус-вектором R и вектором момента M_1 , измеренный методом, использующим один диполь. Все углы измерены в градусах.

На нижнем графике представлен угол бокового уклонения гондолы от продольной плоскости вертолета ψ , в градусах.

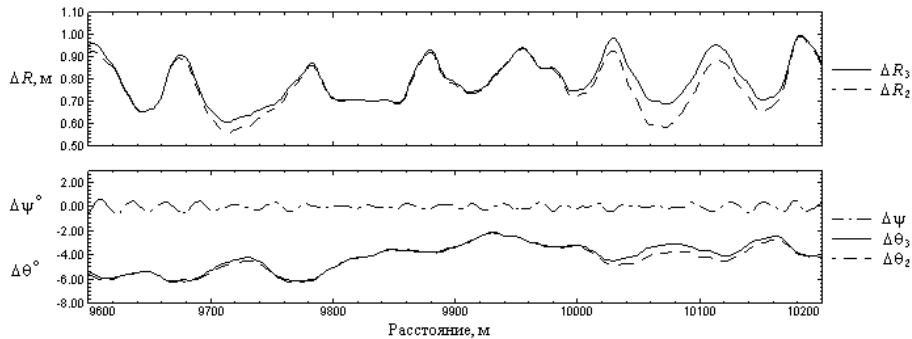


Рис. 11. Расхождение измеренных расстояний и углов для вертолета Ми-8.

На верхнем графике Рисунка 11 показана разница расстояний, вычисленных электромагнитным методом и с использованием СНС, в метрах. Постоянная составляющая, около 80 см, обусловлена смещением антенн СНС, а также ошибками начальной калибровки системы. Колебания ΔR , амплитуда которых 10-15 см, обусловлены угловыми эволюциями гондолы, и, как следствие, угловыми колебаниями датчика переменного магнитного поля относительно антенны СНС, расстояние между которыми около 1.5 м. Прерывистая линия ΔR_2 соответствует расстоянию, вычисленному без учета бокового отклонения, т.е. с учетом измерений поля только двух диполей. Расхождение ΔR_2 и ΔR_3 не превышает 10 см при боковых отклонениях до 15 градусов.

На нижнем графике показано аналогичным образом рассчитанное расхождение углов $\Delta\theta_2$ и $\Delta\theta_3$, в градусах. Здесь изменение $\Delta\theta$ в диапазоне от -4 до -6 градусов в значительной мере обусловлено тангажными эволюциями ЛА. Разница между $\Delta\theta_2$ и $\Delta\theta_3$ не более 0.7 градуса.

На этом же графике показана высокочастотная составляющая угла бокового смещения $\Delta\psi$, в градусах. Колебания с периодом около одной секунды и амплитудой до 0.5 градуса обусловлены особенностями крепления дополнительных диполей, сигналы которых, в нашем случае, определяют угол ψ . Дело в том, что дополнительные петли, смонтированные в передней части фюзеляжа (Рис. 8), не имеют жесткой рамы крепления и изменяют свою конфигурацию под влиянием набегающего потока.

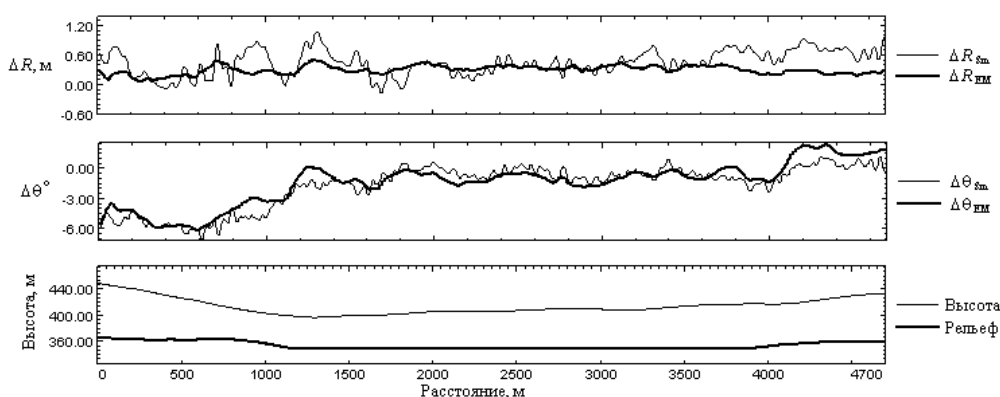


Рис. 12. Расхождение измеренных расстояний и углов для самолета Ан-2.

На Рисунке 12 показаны результаты испытаний на самолете Ан-2 с двумя диполями. Испытания проводились с обычной гондолой. На верхнем графике показана разница расстояний, измеренных с помощью СНС в дифференциальном режиме и электромагнитным методом, в метрах. ΔR_{EM} — для метода, использующего два диполя, ΔR_{Sm} — для метода, использующего один диполь. На среднем графике — разница углов, рассчитанных электромагнитным методом и с использованием СНС. $\Delta\theta_{EM}$ — для метода, использующего два диполя, $\Delta\theta_{Sm}$ — для метода, использующего один диполь.

Следует отметить, что полет выполнялся с обтеканием рельефа, графики рельефа и высоты — в нижней части рисунка. Первые 1000 метров самолет летит с пикированием, в конце около 700 метров с кабрированием.

Амплитуда колебаний ΔR_{EM} в прямолинейном полете составляет 5 см, ΔR_{Sm} — 20 см. В режиме пикирования амплитуда колебаний ΔR_{EM} — 20 см, ΔR_{Sm} — 40 см. Характерное время изменения ΔR_{EM} порядка десяти секунд — медленные колебания гондолы на тросе длиной 70 м. В ΔR_{Sm} появляется составляющая с периодом около 1.5 с. Она обусловлена угловыми колебаниями приемника. Постоянная составляющая смещения обусловлена наличием смещения антенн СНС и ошибками начальной калибровки.

Анализируя графики $\Delta\theta$ можно отчетливо выделить зоны пикирования и кабрирования. В первом случае угол θ на 3-4 градуса меньше, чем при прямолинейном полете, во втором — на 2-3 градуса больше. В графике $\Delta\theta_{Sm}$ прослеживается составляющая, связанная с колебаниями приемника. Амплитуда — 1-2 градуса.

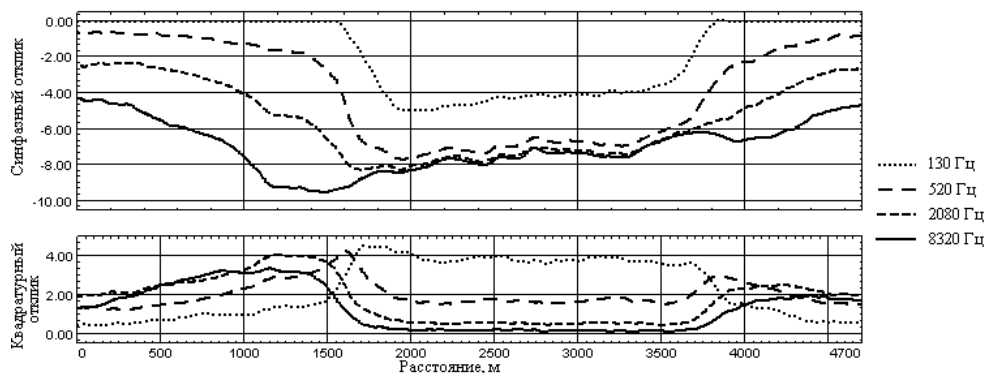


Рис. 13. Вертикальная проекция вектора отклика, синфазная и квадратурная компоненты.

На Рисунке 13 показан результат использования навигационных параметров. Вылет, представленный на Рисунках 12 и 13, сделан над соленым озером Тус, Хакасия. Удельное сопротивление слагающих пород около 100 Ом, сопротивление соленой воды порядка 0.1 Ом. Благодаря найденному навигационному решению удалось выделить отклик в синфазной компоненте поля и в изолирующей области, и над проводником (верхний график). Это дает существенное упрощение интерпретации данных. Например, квадратурная компонента сигнала на частоте 2080 Гц имеет одинаковую амплитуду над берегом и над озером (нижний график), тогда как синфазная компонента отклика отличается на порядок.

Заключение

Решение описанной навигационной задачи имеет важное практическое значение. Во-первых, достигнута точность определения расстояния на уровне точности решения дифференциального режима спутниковой навигации. Показано, что точность определяется стабильностью геометрических параметров петель передатчика и потенциально может быть лучше одного сантиметра.

Во-вторых, получены углы взаимной ориентации с точностью лучше одного градуса.

В-третьих, полученное навигационное решение впервые позволило определить полный вектор отклика в задаче аэроэлектроразведки с использованием систем описанного типа. Система EM-4H стала единственной в мире системой с нежесткой базой, измеряющей синфазную и квадратурную компоненты отклика с погрешностью около 1% при интервале осреднения около 0.5 с.

В работе также было показано, что для целей аэроэлектроразведки использование двух диполей, смонтированных в продольной вертикальной плоскости достаточно для определения геометрических параметров с нужной точностью.

Работа выполнена при поддержке компании ЗАО «Геотехнологии», производителя системы EM-4H.

Литература

1. **Бологин Ю.В., Голован А.А., Кручинин П.А., Парусников Н.А., Тихомиров В.В., Трубников С.А.** Задача авиационной гравиметрии. Некоторые результаты испытаний// Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1, Математика, механика. - 1999. - Вып. 2. - С.36—41.
2. **David Fountain** 60 years of airborne EM – focus on the last decade// AEM 2008 — 5th International conference on airborne electromagnetics. - Haikko Manor, Finland, 2008. - P.01-01
3. **Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Попович В.В.** Низкочастотная индуктивная аэроэлектроразведочная система EM-4H// Материалы XXXV сессии международного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». - Ухта, 2008. - С.51-54.
4. **Andrey Volkovitskiy, Evgeny Karshakov, Alexey Trusov** Four frequency aem system EM-4H// AEM 2008 — 5th International conference on airborne electromagnetics. - Haikko Manor, Finland, 2008. - P.02-04
5. **Петров С.И., Новак В.Д., Тихомиров О.А.** Аэроэлектроразведка методом ДИП-А// Разведка и охрана недр. - 2006. - № 5. - С.38-42.
6. **Klaus-Peter Sengpiel and Bernhard Siemon** Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration// Geophysics. - 2000. - Vol.65, No.6. - Pp.1983-1992.
7. **Haoping Huang and Douglas C. Fraser** The use of quad-quad resistivity in helicopter electromagnetic mapping// Geophysics. - 2002. - Vol.67, No.2. - Pp.459-467.
8. **S.W. Hefford, R.S. Smith and C. Samson** Quantifying the effects that changes in transmitter-receiver geometry have on

- the capability of an airborne electromagnetic survey system to detect good conductors// Exploration and Mining Geology.- 2006.- Vol.15, Nos.1-2.- Pp.43-52
9. **Парселл Э.** Берклеевский курс физики. Том II. Электричество и магнетизм. М.: Наука.- 1983.
 10. **Richard S. Smith** Tracking the transmitting-receiving offset in fixed-wing transient EM systems: methodology and application// Exploration Geophysics.- 2001.- No.32.- Pp.014-019.
 11. **Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Попович В.В.** Компенсация влияния наведенных токов в низкочастотной индуктивной аэроэлектроразведочной системе EM-4Н// Материалы международной конференции, посвященной 50-летию Института геофизики УрО РАН «Геофизические исследования Урала и сопредельных регионов».- Екатеринбург, 2008.- С.40-43.