

Lapshin Vladimir Borisovich – e-mail: director@ipg.geospace.ru; phone: +74991878186; director; dr. of phis.-math. sc.; professor.

Panshin Evgeny Alexandrovich – e-mail: pansevgenij@yandex.ru; phone: +74991813622; senior assistant.

Dorenskiy Sergey Vladimirovich – e-mail: Libertango@inbox.ru; phone: +79266134074; post-graduate student.

УДК 550.837.6

А.К. Волковицкий, Е.В. Каршаков, Б.В. Павлов

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРОД КАК НАВИГАЦИОННОЕ ПОЛЕ ДЛЯ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Рассматриваются средства дистанционного измерения эффективного удельного сопротивления с борта летательного аппарата. Дается классификация бортовых электромагнитных систем, решающих задачу оценивания эффективного удельного сопротивления. Выписываются соотношения, лежащие в основе алгоритмов вычисления эффективного удельного сопротивления. Приводятся некоторые результаты экспериментальных работ, а также результаты сравнения полученных оценок эффективного удельного сопротивления с материалами наземных средств измерения. Исследуются возможности применения параметров распределения удельного сопротивления в качестве навигационного поля для корреляционно-экстремальных навигационных систем.

Электромагнитные измерения; эффективное удельное сопротивление; корреляционно-экстремальные навигационные системы.

A.K. Volkovitsky, E.V. Karshakov, B.V. Pavlov

THE DISTRIBUTION OF SOIL EFFECTIVE RESISTIVITY AS A NAVIGATION FIELD FOR CORRELATION-EXTREMAL SYSTEMS

The article deals with the means of remote effective resistivity measurements on board of the aircraft. Airborne electromagnetic systems which are used for effective resistivity estimation task are classified. The relations forming the basis of the effective resistivity estimation task solution are presented. The results of experimental studies are given. The results of comparison of effective resistivity measured by airborne system and by ground-based one. The capabilities of the distribution of resistivity parameters as a navigation field for correlation-extremal navigation systems are investigated.

Electromagnetic measurements; effective resistivity; correlation-extremal navigation systems.

Введение. Навигация по геофизическим полям – полю рельефа, оптическому полю, аномальному магнитному и гравитационному полям Земли и т.д., – широко применяется при построении бортовых информационно-управляющих систем [1]. При этом ведутся широкомасштабные работы по исследованию навигационных свойств того или иного поля с оценкой их применимости в задачах корреляционно-экстремальной навигации.

В данной работе также исследуется одно из полей – поле удельных сопротивлений пород. Важнейшей особенностью, которая отличает данный тип поля от многих других, является то, что соответствующий параметр не является результатом измерений, как в случае магнитного или гравитационного поля, а вычисляется по измерениям электромагнитной системы того или иного типа. В случае дистан-

ционных измерений с борта летательного аппарата современными электромагнитными системами измеряются компоненты переменного магнитного поля индукционным приемником. В системах наземного базирования появляется возможность измерять не только магнитную, но и электрическую составляющую электромагнитного поля [2].

Существуют хорошо развитые методики интерпретации измерений электромагнитных систем, предполагающие решение обратной задачи – поиска распределения удельного сопротивления внутри Земли, – в одно-, двух- и трехмерном варианте [3]. Однако, в силу известной некорректности обратной задачи, результат интерпретации может зависеть как от выбранной методики решения, так и от типа применяемой электромагнитной системы. В частности, результат двумерной инверсии для какой-то линии измерений в общем случае не будет являться сечением для трехмерного решения, полученного с использованием того же профиля, так как в первом случае предполагается однородность распределения сопротивления в направлении, ортогональном данной линии, а во втором определяется неоднородность во всех направлениях.

В данной работе предлагается использование традиционного для всех электромагнитных систем параметра – эффективного, или кажущегося удельного сопротивления [2]. Под этим понятием подразумевается удельное сопротивление эквивалентного полупространства, т.е. однородного проводящего полупространства, отклик от которого не отличим от измеренного отклика для выбранного канала измерений электромагнитной системы.

Бортовые электромагнитные системы. За более чем 60-летнюю историю разработан целый ряд модификаций аэроэлектромагнитных систем [4]. Их можно классифицировать следующим образом.

Пассивные системы. Это системы, для которых источником переменного магнитного поля являются естественные или глобальные искусственные процессы, протекающие на Земле – возмущения ионосферы, грозы, приливные вариации магнитного поля, работа мощных низкочастотных передатчиков и т.п. Поскольку источник поля не контролируем, результатом измерений является тот или иной импеданс, например отношение вертикальной и горизонтальной компонент переменного поля на заданной частоте. Такие системы хорошо зарекомендовали себя в наземных вариантах – это магнито-теллурическое зондирование (МТЗ) и АМТЗ (аудио – в звуковом диапазоне частот) [2]. Существуют реализации аэровариантов АМТЗ: Z-ТЕМ, AirMT [5].

Главное преимущество таких электромагнитных систем – отсутствие передатчика.

Основная проблема, связанная с использованием таких систем, – очень низкие амплитуды гармоник естественных электромагнитных полей по сравнению с постоянным магнитным полем Земли и с полем летательного аппарата-носителя. Так, в ряде экспериментов в средней полосе России был измерен уровень естественных полей для частоты 100 Гц – порядка 8 мкА/м, тогда как постоянное магнитное поле составляет около 40 А/м. Очевидно, что даже при незначительных ($\sim 3^\circ$) низкочастотных ($\sim 0,3$ Гц) угловых колебаниях приемника переменная составляющая поля в проекции на ось чувствительности датчика будет превышать амплитуду естественных полей на пять порядков. Заметим также, что и аномальное магнитное поле Земли, влияющее на изменение потока магнитного поля за счет движения летательного аппарата, и переменная составляющая магнитного поля летательного аппарата приводят к появлению паразитного сигнала, значительно превышающего полезный сигнал. Следствием этого являются повышенные требования к обеспечению динамического диапазона датчика переменного магнитного поля – 24 разряда или более.

Все перечисленные выше системы, применяемые для геофизических исследований, выполнены в буксируемом варианте. При этом приемник удален от летательного аппарата на расстояние около 100 метров. Кроме того, накладываются существенные ограничения на режимы пилотирования. В частности, скорость буксировки AirMT составляет 90 км/ч. Также при работе данных систем приходится выбирать интервал времени, в котором естественные поля наиболее интенсивны.

Системы с контролируемым источником. Существуют различные модификации электромагнитных систем, включающие в свой состав источник поля. Такая конфигурация системы позволяет снизить требования к динамическому диапазону приемника за счет повышения амплитуды возбуждаемого поля.

Данные системы условно можно разделить на две группы. К первой группе относятся те, в которых генератор поля и приемник жестко связаны. Есть системы, где и передатчик, и приемник переменного магнитного поля устанавливается на борту летательного аппарата, такие как JAC [6]. Другой вариант – установка и передатчика, и приемника на одной буксируемой конструкции: Hammingbird, Aerotem [4].

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.

Ко второй группе относятся системы с изменяемой базой. В системах этой группы, увеличивая базу, можно уменьшить влияние первичного поля. Главный недостаток систем с переменной базой – изменяющееся поле при изменении взаимного расположения передатчика и приемника. Как следствие, требуется информация о взаимном расположении передатчика и приемника [7].

Известны варианты электромагнитных систем, в которых передатчик устанавливается неподвижно на земле [8]. Однако зона работоспособности такой системы ограничивается радиусом распространения поля передатчика – до 1–2 км. Для задач корреляционно-экстремальной навигации больший интерес представляют системы, в которых передатчик перемещается так же, как и приемник. К таким системам относятся электромагнитные комплексы EM-4H, Экватор и многие другие [9, 10].

Вычисление эффективного удельного сопротивления. Наиболее общая геометрическая схема аэроэлектромагнитной системы с контролируемым источником показана на рис. 1.

Можно показать, что поле отклика на определенной частоте возбуждения выражается следующим образом [2]:

$$H_r^i(r, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty u^i(n_0, z) J_1(n_0 r) n_0^2 dn_0, \quad (1)$$

$$H_z^i(r, z) = -\frac{1}{2\pi} \int_0^\infty u^i(n_0, z) J_0(n_0 r) n_0^2 dn_0.$$

Здесь H_r^i, H_z^i – амплитуды горизонтальной и вертикальной составляющих напряженности переменного магнитного поля отклика для соответствующей гармоники возбуждения, r, z – координаты приемника (рис. 1), u^i – двумерный пространственный спектр поля отклика, $n_0 = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, k_x, k_y – пространственные частоты двумерного преобразования Фурье, J_0 – функция Бесселя первого рода 0-го порядка, J_1 – функция Бесселя первого рода 1-го порядка [11].

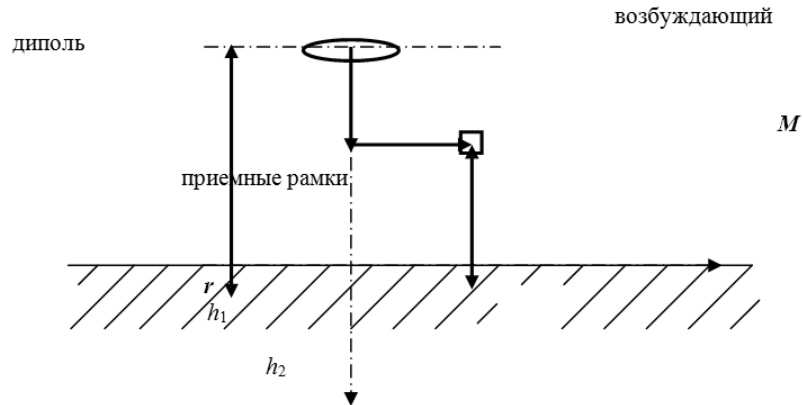


Рис. 1. Схема аэроэлектромагнитной системы

Спектр поля отклика над однородным полупространством выражается так [2]:

$$u^i(n_0, z) = \frac{|M| e^{n_0(z-h_1)}}{2} \cdot \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0}. \quad (2)$$

Здесь $|M|$ – величина момента диполя передатчика, h_1 – высота передатчика (см. рис. 1), $n_1 = \sqrt{n_0^2 - i\omega\mu_0\sigma}$, где i – мнимая единица, μ_0 – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума), ω – частота возбуждения, σ – удельная проводимость полупространства [См/м]. Удельное сопротивление выражается следующим образом: $\rho = 1/\sigma$ [Ом·м].

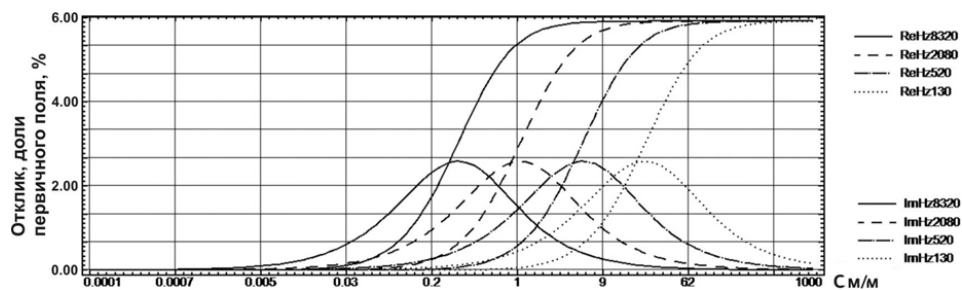


Рис. 2. Амплитуды синфазной (ReHz) и квадратурной (ImHz) компонент отклика как функции удельной проводимости для частот 130, 520, 2080 и 8320 Гц

Отметим, что соотношения (1), (2) записаны в комплексных числах. При этом действительная часть соответствует синфазной возбуждению части отклика, а мнимая – квадратурной, т.е. сдвинутой относительно фазы возбуждения на $\pi/2$. Данные соотношения позволяют получить функцию зависимости отклика от удельного сопротивления полупространства. Характер зависимости отклика от частоты и удельной проводимости однородного полупространства можно видеть на рис. 2 (высота передатчика 100 метров, расстояние до приемника 70 метров, эти параметры фиксированы).

Оценка применимости в задачах навигации. Для возможного применения поля свойств проводимости при решении задач навигации следует отметить следующие важные свойства.

1. Поскольку в соотношении (2) удельная проводимость входит в произведение с частотой, зависимость отклика от σ для одной частоты может быть пересчитана в зависимость для любой другой частоты умножением удельной проводимости на соответствующий коэффициент.

2. Характер зависимости величины отклика от удельной проводимости пространства схож с логнормальным распределением. Как следствие, одна и та же ошибка измерения компонент отклика приводит к различным погрешностям вычисления удельной проводимости в зависимости от того, в каком диапазоне проводимости работает система. Чувствительность современных аэроэлектромагнитных систем – 10^{-4} – 10^{-5} от величины первичного поля. Это означает, что аномальный отклик может быть измерен с точностью 10^{-2} – 10^{-3} . Очевидно, что аномалия удельного сопротивления 1 Ом·м на фоне 2–3 Ом·м будет надежно измерена, а на фоне 1000 Ом·м не будет выделена.

3. Можно показать, что даже в случае хорошо проводящих областей поле отклика быстро убывает с ростом высоты над рельефом. Так, для абсолютно проводящего полупространства справедлив следующий предельный переход:

$$H_z^i(0, -h_2) \rightarrow -\frac{|M|}{2\pi(h_1 + h_2)^3}. \quad (3)$$

Здесь h_1 – высота передатчика, h_2 – высота приемника над землей. То есть отклик убывает пропорционально кубу высоты. Максимальная заявленная и экспериментально подтвержденная высота, на которой современная электромагнитная система ВТЕМ способна измерить отклик от земли, составляет около 700 метров [12].

4. Горизонтальное разрешение получаемых параметров проводимости также существенно зависит от высоты полета. Дело в том, при изменении высоты меняется размер зоны возбуждения на поверхности земли, как показано на рис. 3. При высоте передатчика 50 метров около 80 % энергии поля сосредоточено в круге диаметра 70 м. Тем не менее для электромагнитной системы Экватор были получены карты эффективных удельных сопротивлений масштаба 1:5000, т.е. 50 метров между точками измерений. Детальность подтверждена сравнением полученной карты с картой масштаба 1:10000 [13]. Высота полета передатчика при этом в среднем составила около 50 метров.

Также опубликованы результаты сравнения материалов съемки системы Экватор с данными об эффективных удельных сопротивлениях, полученных наземными методами [14]. Съемка Экватором масштаба 1:25000 выполнялась с высоты 70–100 метров (от передатчика). Наземная съемка выполнена масштабом 1:10000. Оценка удельного сопротивления совпадает с точностью порядка 1 %. Однако границы аномальных зон, полученные при аэросъемке, размыты за счет большой зоны возбуждения по сравнению с границами на карте, полученной по результатам наземной съемки.

5. Поле эффективных сопротивлений можно считать очень устойчивым. Это подтверждается работами, выполненными ЗАО «ГНПП «Аэрогеофизика»» на полярном Урале [15]. Работы выполнялись участками несколькими комплексами ЕМ-4Н, часть которых была установлена на самолетах Ан-2, а часть – на вертолетах Ми-8. Работы проводились в течение нескольких лет. В результате была получена единая карта распределения эффективных сопротивлений для большого региона.

6. Результаты измерений аэроэлектромагнитных систем применяются для уточнения геологических границ, разломов и т.п. Как следствие, зона изменения или аномалии удельного сопротивления может быть предсказана при наличии достаточно точной геологической карты.

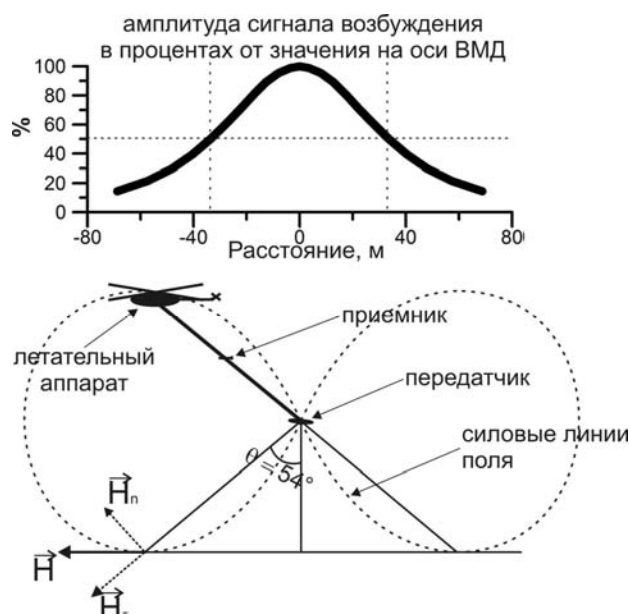


Рис. 3. Общая схема геометрии вертолетной электроразведочной системы на внешней подвеске с разнесенными передатчиком и приемником и график зависимости амплитуды сигнала возбуждения в процентах от значения на оси магнитного диполя (ВМД), пунктиром указаны расстояния от оси ВМД при значении сигнала возбуждения 50 % от значения на оси

Заключение. В статье были исследованы вопросы применимости электромагнитных систем в задачах навигации. Показано, что для корреляционно-экстремальных навигационных систем более перспективны электромагнитные системы с контролируемым источником. Несмотря на ограничения, связанные существенной зависимостью результатов от высоты полета над рельефом, само значение эффективного удельного сопротивления является достаточно устойчивым параметром, мало зависящим от применяемого метода измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин И.П. Основы навигации по физическим полям. – М.: Наука, 1985. – 328 с.
2. Жданов М.С. Электроразведка: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1986. – 316 с.
3. Тригубович Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. 3D-электроразведка становлением поля. – Новосибирск.: Наука, 2007. – 218 с.
4. Fountain D. 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.
5. Lo B., Kuzmin P. Z-TEM (Airborne AFMAG) as Applied to Hydrocarbon Prospecting // AEM 2008, 5th International Conference on Airborne Electromagnetics. – Haikko Manor, Finland, 2008. – P. 06-02.
6. Rabenstein L., Haas C., Lobach J. Development and Test a Fixed Wing AEM Sea Ice Thickness Sounder // AEM 2008, 5th International Conference on Airborne Electromagnetics. – Haikko Manor, Finland, 2008. – P. 06-06.
7. Павлов Б.В., Волковицкий А.К., Каршаков Е.В. Низкочастотная электромагнитная система относительной навигации и ориентации // Гирология и навигация. – 2010. – № 1 (68). – С. 3-15.

8. *Mog T., Fomenko E.* Transient Responses for Three Dimensional Structures of Grounded Source Airborne EM (GRATEM) // AEM 2008, 5th International Conference on Airborne Electromagnetics. – Haikko Manor, Finland, 2008. – P. 06-04.
9. *Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Мойлайнен Е.В.* Низкочастотная индуктивная аэроэлектроразведочная система EM-4H // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 224–227.
10. *Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Мойлайнен Е.В.* Новая вертолетная электроразведочная система «Экватор» для метода АМПП // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2010. – № 02 (32). – С. 27-29.
11. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1978. – 831 с.
12. *Killean P.G.* Exploration Trends and Developments in 2009. / ed.: Werniuk G. – In co-op. with The Northern Miner, Toronto, Ontario, 2010. – 26 p.
13. *Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Вовенко Т.А.* Возможности вертолетной системы “Экватор”, реализующей метод переходных процессов // Материалы 5-й Всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли (ЭМЗ-11). Книга 2. – СПб., 2011. – С. 437-440.
14. *Мойлайнен Е.В., Кирплюк П.В., Мельников П.В.* Применение аэроэлектроразведочной системы «Экватор» в горных условиях Восточного Саяна // Материалы 5-й Всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли (ЭМЗ-11). Книга 2. – СПб., 2011. – С. 282-285.
15. *Трусов А.А.* Особенности современной аэроэлектроразведки // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 7. – С. 31-36.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. М.Ю. Медведев.

Волковицкий Андрей Кириллович – Учреждение Российской Академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; e-mail: avolkovitsky@yandex.ru; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65; тел.: 84953349080; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; ведущий инженер.

Volkovitsky Andrey Kirillovich – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS; e-mail: avolkovitsky@yandex.ru; Russia, 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; phone: +74953349080; the dynamic information-control systems laboratory; leading engineer.

Каршаков Евгений Владимирович – e-mail: karshak@mail.ru; тел.: 84953349080; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; с.н.с.; к.ф.-м.н.

Karshakov Evgeny Vladimirovich – e-mail: karshak@mail.ru; phone: +74953349080; the dynamic information-control systems laboratory; senior researcher; can. of phis.-math. sc.

Павлов Борис Викторович – e-mail: pavlov@ipu.ru; тел.: 84953349351; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; гл.н.с.; д.т.н.

Pavlov Boris Viktorovich – e-mail: pavlov@ipu.ru; phone: +74953349351 the dynamic information-control systems laboratory; chief researcher; dr. of eng. sc.

УДК 004.94, 519.8, 537.86

Д.Д. Ступин

ВОЗМОЖНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ СИТУАЦИИ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ РЛС НАБЛЮДЕНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ И КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ БОЛЬШОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Рассмотрены возможные направления повышения информационно-энергетических параметров РЛС наблюдения баллистических и космических объектов (КО). Сформулированы задачи для РЛС этого класса с точки зрения распознавания нештатных ситуаций в зоне РЛС. Рассмотрены качественные признаки нештатных ситуаций в зоне действия РЛС и возможные количественные оценки их достоверности, необходимые для надежно