

УДК 550.837.6

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

© 2022 г. Е. В. Мойланен\*

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, г. Москва, Россия*

*\*E-mail: moilanen@mail.ru*

Поступила в редакцию 02.03.2022 г.

После доработки 22.03.2022 г.

Принята к публикации 15.04.2022 г.

Подробно описаны особенности аэроэлектроразведочных методов. Приведена классификация аэроэлектроразведочных систем. Рассмотрены современные активные системы с частотным, импульсным и комбинированным возбуждением сигнала, а также пассивные системы. Показаны особенности, с которыми сталкиваются при разработке и эксплуатации аэроэлектроразведочных систем. Обсуждаются особенности обработки измеряемых на борту летательного аппарата сигналов, способы повышения чувствительности, мобильности, надежности систем. Приводятся результаты съемок. Показано, какие задачи аэроэлектроразведка на сегодня успешно решает.

*Ключевые слова:* аэроэлектроразведка, МПП, Frequency Domain, Time-Domain.

**DOI:** 10.31857/S0002333722050210

### ВВЕДЕНИЕ

Первая аэроэлектроразведочная система была создана в середине прошлого столетия. За последние годы было разработано огромное количество аэроэлектроразведочных систем, которые устанавливаются на фюзеляже или внешней подвеске летательного аппарата [Fountain, 1998; Sorensen et al., 2013; Kaufman et al., 2014; Smith, 2014; Legault, 2015; Sorensen, 2018].

Системы классифицируются на активные, которые включают в себя передатчик и приемник, и пассивные, включающие только приемник (рис. 1). Вне зависимости от типа, все аэроэлектроразведочные системы измеряют переменную составляющую электромагнитного поля.

Наибольшее распространение получили индукционные датчики, измеряющие компоненты вектора переменного электромагнитного поля.

За последнее десятилетие уровень шумов измерителя значительно снизился (рис. 2).

### ПАССИВНАЯ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Пассивные электроразведочные системы измеряют гармонические составляющие компонент вектора переменного магнитного поля Земли и, в некоторых случаях, компоненты вектора переменного электрического поля. Источники электромагнитного поля могут быть как естественного происхождения: близкие или удаленные грозы, возмущения в ионосфере, вызванные солнечным излучением и т.п., так и техногенные – по-

ле низкочастотных радиопередатчиков, применяемых для связи с морскими судами, в том числе подводными, на больших расстояниях [Palacky, West, 2008] (СДВР – сверхдлинноволновые радиостанции).

Пассивные системы с естественными источниками работают на достаточно низких частотах и имеют наибольшую глубинность исследований (рис. 3) [Lo, Kuzmin, 2008].

Между активной и пассивной аэроэлектроразведкой находятся системы, источники возбуждения для которых специально располагаются на земле: аэроэлектроразведка методом длинного кабеля (БДК), методом незаземленной петли (НП) и методом заряда [Человечков и др., 2012].

### АКТИВНАЯ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

В активной аэроэлектроразведке для создания зондирующего поля принято пользоваться либо непрерывным гармоническим, либо импульсным методом возбуждения. В первом случае сигнал представляет собой суперпозицию нескольких синусоидальных колебаний с фиксированными частотами, во втором – регулярную последовательность импульсов с паузой между ними. Соответственно принципы интерпретации сигналов, а вместе с ними и сами системы, разделяются на метод дипольного индукционного профилирования в аэроварианте, в англоязычной терминологии “Frequency-Domain” (FD) – частотные системы (рис. 4) и метод переходных процессов в аэро-

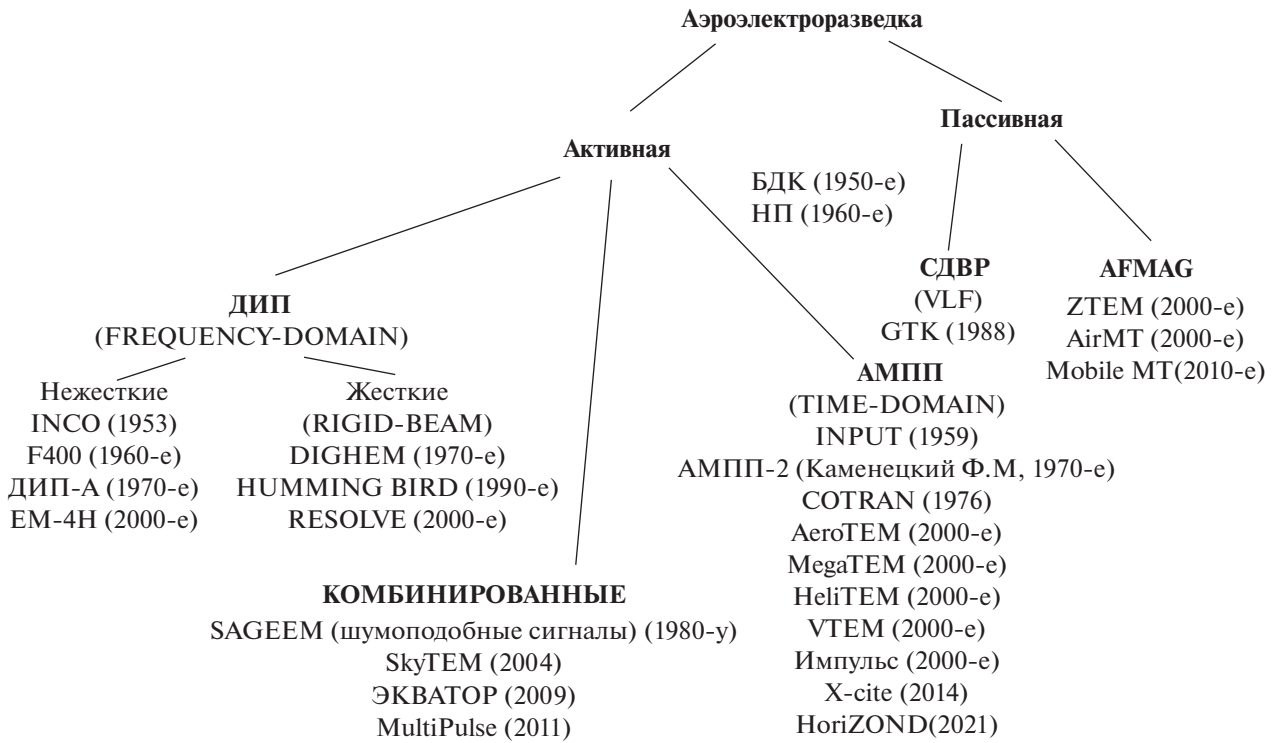


Рис. 1. Классификация основных типов аэроэлектроразведочных систем.

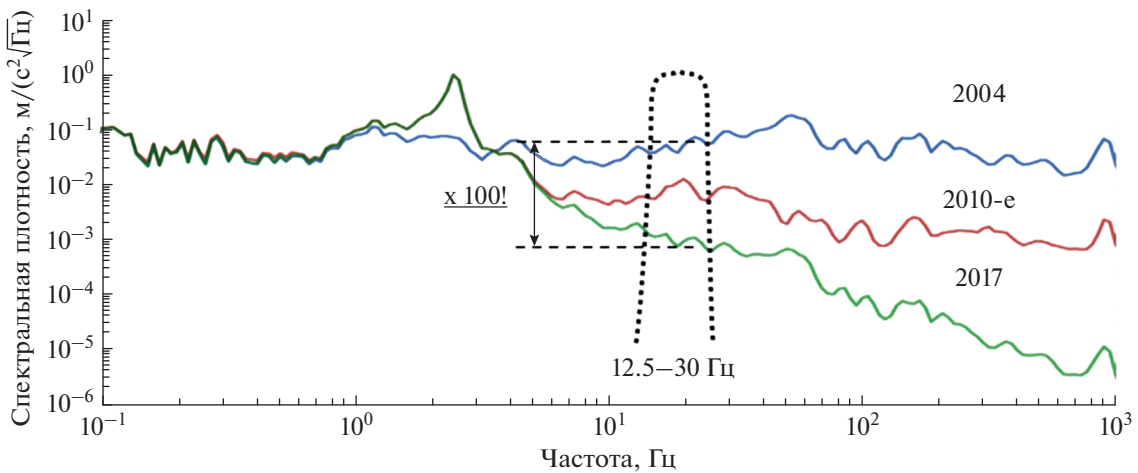


Рис. 2. Спектральная плотность измерений шумов текущего и предыдущих поколений приемников [Sorensen, 2018].

варианте, “Time-Domain” (TD) – временные системы (рис. 5).

В классической парадигме систем Time-Domain сигнал отклика следует за спадающим фронтом зондирующего импульса. Приемник непосредственно измеряет переходную характеристику геоэлектрического разреза при полном отсутствии влияния первичного поля. Отклики от объектов различной проводимости разделяются по скорости спада напряжения на клеммах-выводах при-

емных рамок. Кажущаяся простота интерпретации для систем Time-Domain и предопределила их популярность.

Мощные временные системы эффективно работают на обнаружение хорошего проводника в относительном изоляторе на больших глубинах даже в присутствии проводящего перекрывающего слоя [Kaufman, 1989]. Верхняя часть разреза (ВЧР) в таком случае остается слабоизученной (рис. 6). Временные системы обладают малым



Рис. 3. Пассивная система MobileMT [Prihodko et al., 2020].

разрешением для удельных сопротивлений свыше  $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Частотные системы позволяют определять удельные сопротивления в значительно более широком диапазоне, чем данные Time-Domain [Hodges, 2013] (рис. 7, рис. 8), что обеспечивается расширением частотного диапазона в сигнале возбуждения в область высоких частот. Благодаря этому можно выявить неоднородности в высокоомных областях и в приповерхностных слоях. Как

следствие, при поисках слабо проводящих объектов эффективнее оказываются менее мощные, но более высокочастотные Frequency-Domain системы.

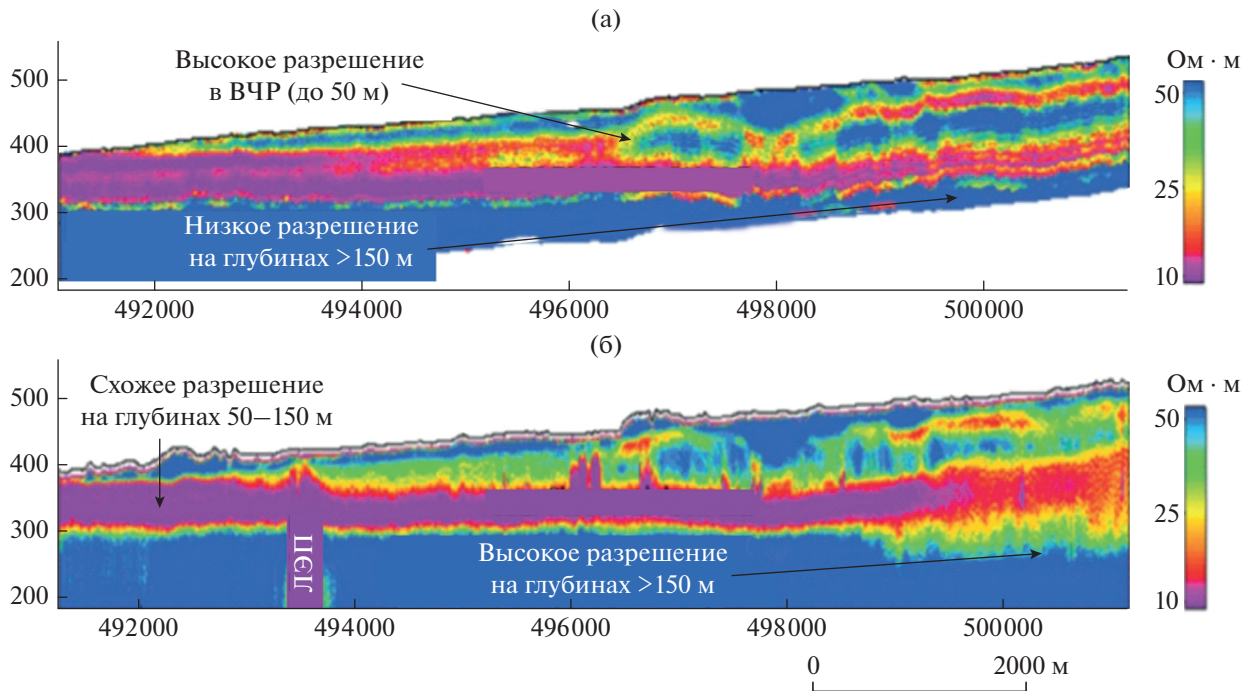
Вследствие того, что приемно-усилительная электроника любой временной аэроэлектроразведочной системы обладает ограниченным частотным диапазоном, спектр реально измеренного сигнала представлен дискретным набором гармоник базовой частоты возбуждения. Определив клас-



Рис. 4. Частотная система с жестким креплением передатчика относительно приемника Texas Gulf Sulphur, 1964 г.



Рис. 5. Активная система, реализующая аэрометод переходных процессов АМПП-2, 1970-е.



**Рис. 6.** Псевдорезрезы кажущихся сопротивлений, построенные для частотной системы (а) и временной системы (б), иллюстрирующие преимущества и недостатки каждого метода [Chen et al., 2014].

сическим способом Frequency-Domain амплитуды и фазы соответствующих гармоник и применив к полученному набору обратное преобразование Фурье, получаем тот самый измеренный сигнал со всеми его искажениями. На возможность такой частотной обработки и интерпретации указывали авторы работы [Becker et al., 1990], когда оценивали преимущества системы COTRAN.

В устройстве системы были применены совершенно революционные для того времени идеи.



**Рис. 7.** Частотная система с жестким креплением передатчика относительно приемника DIGHEM.

Двухкомпонентный ( $XZ$ ) приемник регистрировал сигнал отклика не только во время паузы, но и во время действия возбуждающего импульса.

### КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

Для изучения верхней части разреза одновременно с традиционным TD на данный момент предложены два решения:

- наряду с длинным и мощным основным импульсом добавляется короткий малоамплитудный дополнительный импульс (SkyTEM, MultiPulse) (рис. 9, рис. 10);
- наряду с длинным и мощным основным импульсом добавляются высокочастотные сигналы (ЭКВАТОР) (рис. 11, рис. 12).

Смешанная форма первичного сигнала, который изображен на рис. 11, и непрерывные измерения позволили эффективно обрабатывать данные в частотной области [Volkovitsky, Karshakov, 2013].

### ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Для корректной обработки вторичного поля на фоне изменяющегося первичного необходимо с очень высокой точностью (уровня 1 ppm) контролировать взаимное расположение передатчика и приемника. Это можно пытаться достичь физически, создавая жесткие конструкции систем.





**Рис. 8.** Частотная система с нежестким креплением передатчика относительно приемника ЕМ-4Н во время съемки, 2014 г.

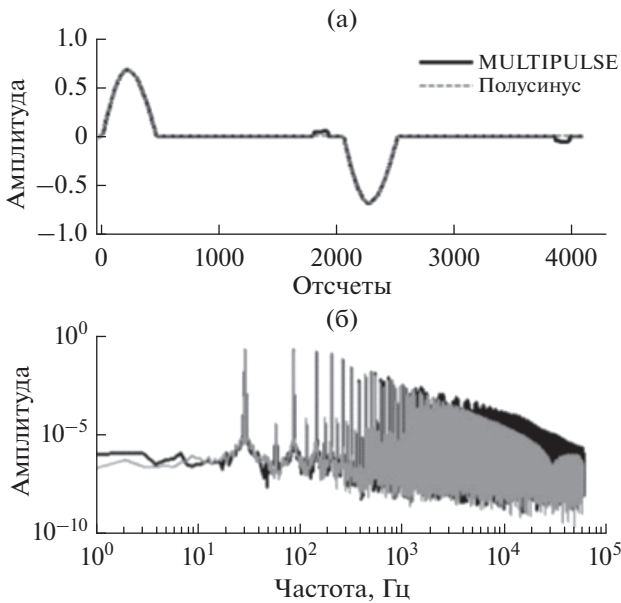


**Рис. 9.** Комбинированная система SkyTEM.

Есть также вариант алгоритмического контроля. В этом случае используются дополнительные источники, которые излучают сигналы собственных фиксированных частот [Pavlov et al., 2010]. Измерения этих сигналов используются и для определения геометрических параметров системы передатчик–приемник, и для моделирования поля носителя в случае установки передатчика на фюзеляже.

Дело в том, что даже прецизионные вычисления в дифференциальном режиме спутниковой навигационной системы не могут обеспечить необходимой точности взаимного позиционирования передатчика и приемника.

Помимо задач компенсации влияния первичного поля определение взаимного расположения передающей и измерительной систем полезно при интерпретации. Так, методики обработки данных до недавних пор не учитывали изменений



**Рис. 10.** (а) – Форма сигнала для системы MULTIPULSE и полусинуса; (б) – их спектры. Длительность полусинуса составляет 4 мс, пиковый момент 700000 Ам<sup>2</sup>.

в координатах приемника [Collet, 1986; Green, Lane, 2003]. Повышение уровня чувствительности аппаратуры потребовало решения данной проблемы. Этим во многом определяется большая популярность систем совмещенной геометрии передатчика и приемника. Альтернатива же фиксированной геометрии – определение координат приемника по показаниям самой электро-разведочной системы, т.е. по измерениям поля передатчика [Smith, 2001; Pavlov et al., 2010].

Перед началом выполнения работ аэроэлектроразведочная система требует проведения процедур настройки, компенсации и калибровки [Kaufman, 2014]. Их применение позволяет суще-

ственно повысить точность измерений с учетом влияния трудно контролируемых дестабилизирующих факторов – влажности атмосферы, механических усталостных деформаций и т.п.

## ОБРАБОТКА В ЧАСТОТНОЙ И ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

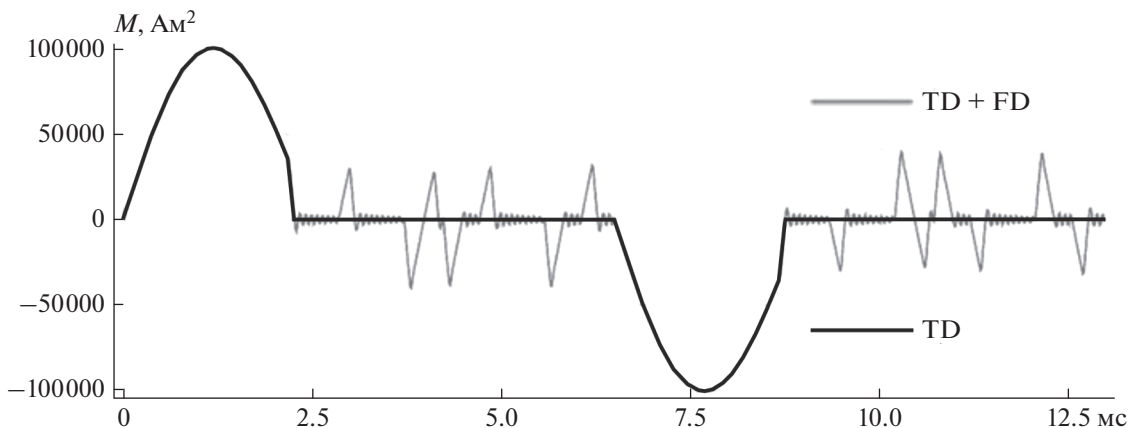
### Преобразование сигналов в частотных системах

В частотных системах форма возбуждающего тока, и, соответственно, зондирующего поля во времени задается выражением  $\mathbf{H}(t) = \mathbf{H}_0 \cos(\omega t + \varphi)$ , замечательным тем, что в предположении квазистационарности при медленном изменении геометрических параметров и пространственного положения измерительной установки вектор амплитуды поля  $\mathbf{H}_0$  можно считать постоянным и для его измерения воспользоваться процедурой синхронного детектирования. На каждой из рабочих частот  $\omega$  из сигнала  $u(t)$  вычисляются следующие свертки:

$$U_c(\omega, \varphi) = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(t)u(t) \cos(\omega t + \varphi) dt,$$

$$U_s(\omega, \varphi) = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(t)u(t) \sin(\omega t + \varphi) dt.$$

Эта процедура иногда еще называется когерентным накоплением, функция  $f(t)$  – весовой функцией когерентного накопления, параметр  $\varphi$  – фазой детектирования. В полученной паре действительных значений  $U_c$  принято называть синфазной, а  $U_s$  – квадратурной компонентой принятого сигнала. Используя формулу Эйлера и переход к комплексной записи из полученных значений составляется значение комплексной амплитуды сигнала  $\tilde{U}(\omega, \varphi) = U_c(\omega, \varphi) + iU_s(\omega, \varphi)$ . В ранних частотных системах синхронное детек-



**Рис. 11.** Форма сигнала для системы ЭКВАТОР (TD + FD) и обрезанного полусинуса (TD).

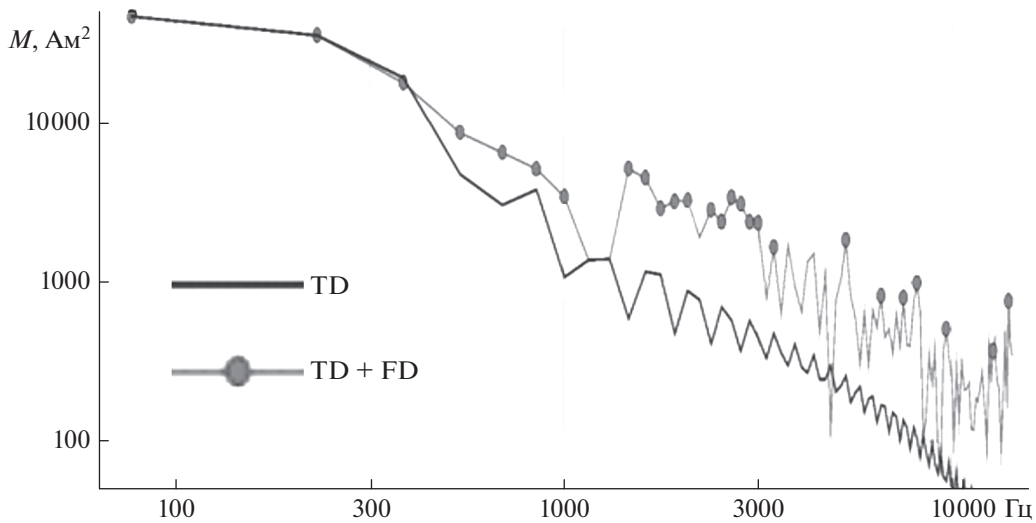


Рис. 12. Спектры для системы ЭКВАТОР и обрезанного полусинуса.

тирование выполнялось аппаратно, но сегодня оказывается удобнее выходной сигнал приемной рамки сначала оцифровать, а затем для вычисления свертки использовать специализированный цифровой вычислитель.

Полученное комплексное число можно в электротехническом смысле считать значением коэффициента связи в системе “передатчик—земля—приемник”. Значение пары квадратурных компонент  $U_c$  и  $U_s$  также могут быть пересчитаны в значение амплитуды и фазы гармонического сигнала

$$|\tilde{U}| = \sqrt{U_c^2 + U_s^2}; \quad \varphi = \arctg\left(\frac{U_s}{U_c}\right).$$

После приема и усиления, сигнал обычно претерпевает искажения, обусловленные неидеальностью линейного усилителя. Основным видом обработки для частотных систем следует считать амплитудно-фазовую коррекцию на частоте детектирования – умножение полученного значения комплексной амплитуды на комплексный коэффициент амплитудно-фазовой поправки:  $\tilde{U}_c(\omega) = \tilde{C}\tilde{U}(\omega)$ .

### Преобразование сигналов в системах Time-Domain

В системах Time-Domain традиционно исследуется временное поведение сигналов: отклик после короткого импульсного воздействия или спад после внезапного выключения магнитного поля. В любом случае такой сигнал содержит паузу между возбуждающими импульсами.

Для физически реализуемого сигнала  $u(t)$ , такого, что  $\int_{-\infty}^{+\infty} |u(t)| dt < \infty$  может быть выполнено преобразование Фурье, то есть, этот сигнал представим суммой гармонических функций (при им-

пульсных сигналах бесконечной). В случае, если измеряемый сигнал на некотором интервале времени можно считать периодическим, его спектр представляется рядом дискретных гармоник, частоты которых кратны частоте периодического сигнала. В системах с импульсным возбуждением нижняя частота в спектре составляет величину, обратную длительности периода повторения, а верхняя устремляется к бесконечности (импульсные системы в аэроэлектроразведочной литературе часто называют широкополосными). Даже при низкой частоте следования зондирующих импульсов для относительно корректного измерения сигнала требуется соблюдение линейности частотной характеристики всего приемо-усилительного тракта в широком диапазоне частот. Реальный сигнал имеет в спектре ограниченное количество гармоник, вследствие чего неизбежно претерпевает искажения. Благодаря тому, что амплитуда гармоник реальных сигналов с ростом частоты все же убывает, форму его удается в некоторой степени восстановить, применяя частотную коррекцию во всем частотном диапазоне измеряемого сигнала:  $\tilde{S}(\omega) = \frac{1}{k(\omega)} S(\omega)$ , где  $S$  и  $\tilde{S}$  –

спектр сигнала до и после коррекции;  $k(\omega)$  – частотная характеристика приемо-усилительного тракта. В ранних системах такая коррекция выполнялась на аппаратном уровне. Сегодня, так же как и в частотных системах оказывается удобнее выполнить оцифровку сигнала, а затем его цифровую частотную коррекцию.

Поскольку на некотором интервале времени сигнал можно считать периодическим, при обработке используется взвешивающее накопление за несколько периодов, подобное когерентному накоплению для частотных систем.



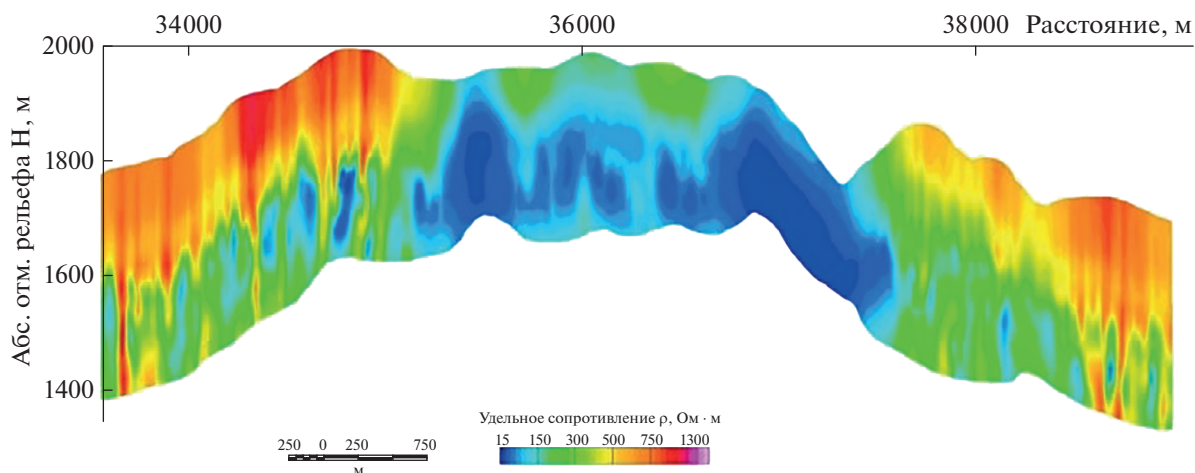


Рис. 13. Разрез кажущихся сопротивлений, построенный только по временным данным.

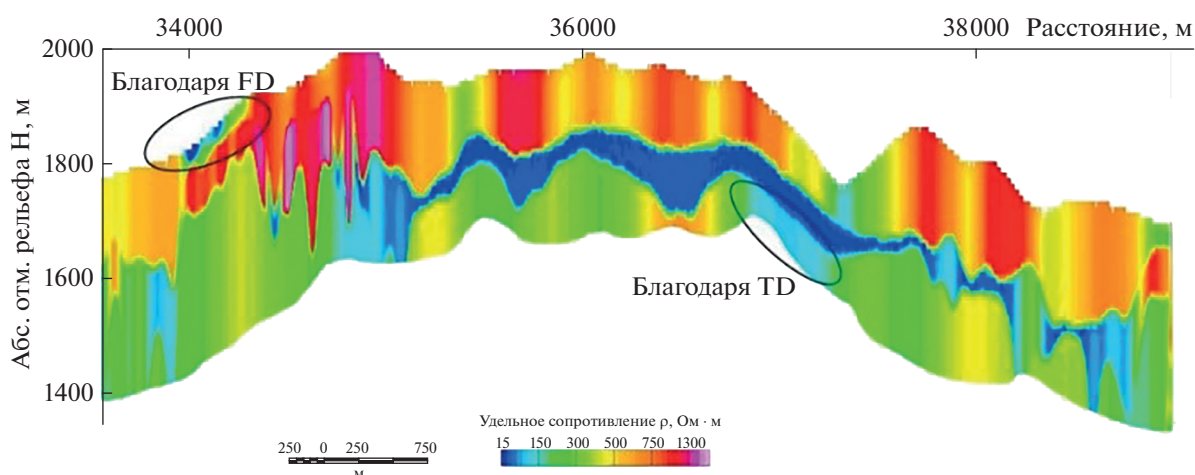


Рис. 14. Результат комбинированной (и временной, и частотной) инверсии данных.

$$U(t') = \sum_{n=0}^l f_n u(t + nT), \quad 0 \leq t' \leq T.$$

Здесь:  $f_n$  – весовые коэффициенты;  $u(t)$  – измеряемый сигнал;  $t'$  – время внутри периода;  $l$  – количество периодов осреднения.

Традиционно, после коррекции сигнала и его накопления интервал изменения переменной  $t'$  разбивается на “окна”, внутри которых осуществляется осреднение:

$$U_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} U(t') dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Завершая рассмотрение процедур обработки сигналов в частотных и импульсных системах, следует обратить внимание, что фактически блок-схема обработки для частотных и импульс-

ных систем одинакова: прием сигнала → усиление и предварительная фильтрация → оцифровка → вычислительная обработка. В аппаратном смысле выраженные отличия между частотными и импульсными системами сегодня почти отсутствуют.

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Методы решения обратных задач геофизики, основанные на детерминированном подходе, изложены в книгах М.Н. Бердичевского, А.А. Кауфмана, М.С. Жданова [Zhdanov, 2002; Бердичевский, Дмитриев, 2009; Kaufman et al., 2014]. Основы стохастического подхода к их решению содержатся в труде А. Тарантолы [Tarantola, 2005]. Теория решения линейных задач оценивания методами калмановской фильтрации и сглаживания



изложена, например, в книгах В.В. Александрова [Александров и др., 2005] и Д. Саймона [Simon, 2006]. Применение итерационного обобщенного фильтра Калмана для решения нелинейных задач описано в статьях [Navlik, Straka, 2015; Karshakov, 2020].

В аэроэлектроразведке даже при небольшом объеме исследований необходимо решить обратную задачу на значительном множестве зондирований. Например, при исследовании небольшой площади (5000 пог. км) получение данных занимает несколько недель. По результатам обработки необходимо найти решение для примерно одного миллиона зондирований. Можно использовать традиционные методы Гаусса–Ньютона, однако они могут занять достаточно много времени. На этапе предварительной интерпретации применяются скоростные автоматизированные решения обратной задачи аэроэлектроразведки. Заслуживают отдельного упоминания работы J. Masnae, реализованные в программе EM Flow [Masnae et al., 1998], решения D. Oldenburg и C. Farquharson, реализованные в ПО EM1DFM и EM1DTM [Farquharson et al., 2003; Farquharson, Oldenburg, 2004]. М. Meju и К.Р. Sengpiel реализовали Conductivity Depth Image (CDI) трансформанты с использованием передаточных функций [Sengpiel, 1988]. Оригинальные работы по мультипараметрической инверсии аэроэлектроразведочных данных в присутствии эффекта ИВП [Viezzoli et al., 2016; Kaminski, Viezzoli, 2017; Fian-daca et al., 2020].

Интерпретация может выполняться как для данных во временной области, так и для данных в частотной области. В случае, когда данные получены в обеих формах представления, появляется возможность комбинировать обработку. Это позволяет объединить преимущества двух методов, получая высокую чувствительность к глубинным проводникам при сохранении детальности в верхней части разреза и высокого разрешения в высокоомных областях.

На рис. 13 представлен разрез кажущихся сопротивлений, построенный только по временным данным аэроэлектроразведочной съемки Руанды в 2017 г. На рис. 14 представлен результат 1D комбинированной инверсии данных. В приповерхностной области в левой части разреза был пропущен проводник. В то же время глубинный проводник справа хорошо виден даже на разрезе кажущихся сопротивлений.

## ВЫВОДЫ

Основным инструментом современной аэроэлектроразведки являются системы МПП, в подавляющем большинстве которых никак не используется информация об откликах, приходя-

щих прямо во время импульса возбуждения. Это позволяет исключить из рассмотрения вопрос о поле наведенных в фюзеляже и в других элементах конструкции токов. Однако в большинстве случаев ВЧР остается слабоизученной.

Комбинированные системы позволяют изучать глубинные проводники, а также выявлять цели в верхней части разреза.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность: Е.В. Каршакову, А.К. Волковицкому, Б.В. Павлову за постоянное внимание к работе; В.М. Керцману, Ю.Г. Подмогову, М.В. Корбакову, В.Ф. Каминскому и рецензентам за ценные советы и замечания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров В.В., Болтынский В.Г., Лемак С.С., Парусников Н.А., Тихомиров В.М.* Оптимальное управление движением. М.: Физматлит. 2005. 376 с.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 680 с.
- Человечков А.И., Ратушняк А.Н., Байдилов С.В., Астафьев П.Ф.* Аэроэлектроразведка при поисках месторождений проводящих руд. Екатеринбург: РИО УрО РАН. 2012. 72 с.
- Becker A., Barringer A.R., Annan A.P.*, 1990, Airborne electromagnetic 1978–1988. Developments and Application of Modern Airborne Electromagnetic Surveys / D.V. Fitterman (ed.). United States: Geological Survey Bulletin. V. 1925. P. 9–20.
- Chen T., Hodges G., Christensen A.N., Lemieux J.* Multi-pulse Airborne TEM Technology and Test Results Over Oil-sands. 76th EAGE Conference, Amsterdam. 2014. P. 4. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20140607>
- Collett L.S.* Development of the airborne electromagnetic techniques, in Airborne Resistivity Mapping // Geological Survey of Canada Paper. 1986. V. 86. P. 9–18.
- Farquharson C.G., Oldenburg D.W., Routh P.S.* Simultaneous 1D-inversion of loop–loop electromagnetic data for magnetic susceptibility and electrical conductivity // Geophysics. 2003. V. 68(6). P. 1857–1869.
- Farquharson C.G., Oldenburg D.W.* A comparison of automatic techniques for estimating the regularization parameter in nonlinear inverse problems // Geophysical Journal International. 2004. V. 156(3). P. 411–425.
- Fiandaca G., Auken E., Madsen L.M.* 3D-time-domain spectral inversion of resistivity and full-decay induced polarization data – full solution of Poisson’s equation and modelling of the current waveform // Geophysical Journal International. 2020. V. 223(3). P. 2101–2116.
- Fountain D.* 1998, Airborne electromagnetic systems – 50 years of development // Exploration Geophysics. 1998. V. 29. № 1–2. P. 1–11.
- Green A., Lane R.* Estimating Noise Levels in AEM Data. 16th Geophysical Conference and Exhibition, Adelaide, Australia. 2003. 5 p.

- Havlik J., Straka O.* Performance evaluation of iterated extended Kalman filter with variable step-length // *J. Physics, Conference Series*. 2015. V. 659. P. 012–022.
- Hodges G.* The power of frequency domain: When you should be using it. Extended Abstracts of the 6th International AEM Conference. Kruger Park, South Africa. 2013. P. 5.
- Kaminski V., Viezzoli A.* Modeling induced polarization effects in helicopter time-domain electromagnetic data: Field case studies // *Geophysics*. 2017. V. 82(2). P. B49–B61.
- Karshakov E.* Iterated extended Kalman filter for airborne electromagnetic data inversion // *Exploration Geophysics*. 2020. V. 51(1). P. 66–73.
- Kaufman A.A.* A paradox in geoelectromagnetism, and its resolution, demonstrating the equivalence of frequency and transient domain methods // *Geoexploration*. 1989. P. 287–317.
- Kaufman A.A., Alekseev D.A., Oristaglio M.* Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics // *Methods in Geochemistry and Geophysics*. 2014. V. 45. 412 p.
- Lane R., Plunkett C., Price A., Green A., Hu Y.* Streamed data, A source of insight and improvement for time domain airborne EM // *Exploration Geophysics*. 1998. V. 29. P. 16–23.
- Legault J.* Airborne Electromagnetic Systems – State of the Art and Future Directions // *CSEG Recorder*. 2015. V. 40(6). P. 38–49.
- Lo B., Kuzmin P.* Z-TEM (airborne AFMAG) as applied to hydrocarbon prospecting. Presented at the 5th International Conference on Airborne Electromagnetics, AEM. 2008. P. 4.
- Macnae J., King A., Stolz N., Osmakoff A., Blaha A.* Fast AEM data processing and inversion // *Exploration Geophysics*. 1998. V. 29(2). P. 163–169.
- Macnae J., Baron-Hay S.* Reprocessing strategy to obtain quantitative early time data from historic VTEM surveys. Proceedings of ASEG. 2010. P. 4.
- Palacky G.J., West G.F.* Airborne Electromagnetic Methods // *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. 2008. V. 2. Applications. P. 811–880.
- Pavlov B.V., Volkovitsky A.K., Karshakov E.V.* Low Frequency Electromagnetic System of Relative Navigation and Orientation // *Gyroscopy and Navigation*. 2010. V. 1. № 3. P. 201–208.
- Prikhodko A., Bagrianski A., Kuzmin P.* Capabilities of the Airborne MobileMT for the Expansion of Active and Historical Mines // *Fast TIMES EEGS*. 2020. V. 25. № 4. P. 107–113.
- Sengpiel K.P.* Approximate inversion of airborne EM data from a multilayered ground // *Geophysical Prospecting*. 1988. V. 36. P. 446–459.
- Simon D.* Optimal State Estimation. Kalman,  $H_\infty$  and Nonlinear Approaches. New Jersey: John Wiley and Sons, Hoboken. 2006.
- Smith R.S.* On removing the primary field from fixed-wing time-domain airborne electromagnetic data: some consequences for quantitative modelling, estimating bird position and detecting perfect conductors // *Geophysical Prospecting*. 2001. V. 49. P. 405–416.
- Smith R.* Electromagnetic Induction Methods in Mining Geophysics from 2008 to 2012 // *Survey Geophysics*. 2014. V. 35. P. 123–156.
- Sorensen K.I., Mai S., Mohr K.R., Nyboe N.S.* Development of High Dipole TDEM Systems. Proceedings of AEM. South Africa: Mpumalanga. 2013. 2 p.
- Sorensen K.I.* The Developments in Helicopter TEM. Proceedings of AEM. Denmark: Kolding. 2018. 2 p.
- Tarantola A.* Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation. SIAM. 2005. 358 p.
- Viezzoli A., Kaminski V., Ebner N., Menghini A.* Extracting IP information from AEM data to improve the hydrogeological interpretation. Extended Abstracts of ASEG 2016 Conference, Adelaide, Australia. 2016. P. 4.
- Volkovitsky A., Karshakov E.* Airborne EM systems variety. What is the difference? Extended Abstracts of the 6th International AEM Conference. South Africa: Kruger Park. 2013. P. 4.
- Zhdanov M.S.* Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems. Elsevier Science B.V. 2002. 635 p.

## Modern Methods of Airborne Electromagnetic Survey

J. Moilanen\*

*Trapeznikov Institute of Control Sciences, Moscow, Russia*

*\*e-mail: moilanen@mail.ru*

Airborne electromagnetic methods are characterized in detail. A classification of airborne electromagnetic systems is presented. Modern active frequency domain, time-domain and combined electromagnetic systems, and electromagnetic passive systems are discussed. The paper demonstrates specific aspects to be considered in the development and operation of airborne electromagnetic systems. The paper discusses aspects of processing of signals measured onboard, and techniques to improve system susceptibility, mobility and reliability. Survey results are presented. The paper shows what kind of problems can be effectively resolved today using airborne electromagnetic surveys.

*Keywords:* airborne electromagnetic survey, TEM, frequency-domain, time-domain