

Секция №7, устный

УДК 550.837.6

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ КВАДРАТУРНЫХ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ СИСТЕМ.

Волковицкий А.К.¹, Мойланен Е.В.²

¹ – Институт проблем управления РАН, Москва,

² – Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, Москва.

Рассмотрены основные шаги эволюции квадратурных аэроэлектроразведочных систем от измерений фазы и ее инвариантов до детектирования синфазной и квадратурной компонент отклика. Выделены специфические технические характеристики частотных аэроэлектроразведочных систем с нежесткой базой. На практических данных показана максимальная глубина обнаружения объекта на уровне 500 м. Проиллюстрированы результаты обработки и интерпретации современной квадратурной системы.

Ключевые слова: INCO, F-400, EM-4H, нежесткая база, частотная область.

Квадратурные аэроэлектроразведочные системы занимают в истории аэроэлектроразведки важное место. Само ее рождение связано с успешно проведенными летом 1948г. испытаниями аэроэлектроразведочной системы, совместной разработки компаний Станмак и МакФар, и внедрением в практику геофизических исследований 1949г компанией Inco [1]. Квадратурными принято называть частотные аэроэлектроразведочные системы, в которых передатчиком устанавливается на борту летательного аппарата, а приемник - в гондоле, буксируемой на длинной гибком тросе-кабеле.

Своим названием они обязаны способу разделения измеренного приемником сигнала на две составляющие - синфазную с возбуждающим полем, и квадратурную. Обе они изменяют свое значение в под влиянием отклика от проводящих геологических объектов, однако в отличие от синфазной, которую по форме невозможно было отличить от возбуждающего поля, квадратурная составляющая поддается непосредственному измерению при помощи синхронного детектирования с соответствующей начальной фазой. Это свойство и использовалось при поисках проводящих объектов.

В период 50 - 70-х годов наряду с жесткими буксируемыми, и даже наряду с Time-Domain системами представители семейства квадратурных находили себе применение и с успехом использовались при аэрогеофизических исследованиях, однако уже к середине 60-х число их заметно поредело, а к середине 70-х в этом классе остались лишь комплекс F-400 (McPhar, Канада) и ДИП-А (ЦНИГРИ, СССР) [2]. В те годы основной задачей аэроэлектроразведки считалось обнаружение мощных массивов сульфидных рудных месторождений. И падение интереса к квадратурным системам связано именно с их неспособностью зарегистрировать отклик от очень проводящего объекта, поскольку он сосредоточен, главным образом, не в квадратурной, а в синфазной компоненте.

В классе частотных систем подавляющее распространение получили жесткие (Rigid-Boom) установки. Они и сегодня составляют значительную часть арсенала средств аэроэлектроразведки. Главным их преимуществом являлась возможность измерения действительной компоненты сигнала отклика благодаря стабильности геометрических параметров установки и возможности компенсации влияния первичного поля. Эти приборы хорошо зарекомендовали себя в задачах исследования сложного строения приповерхностной части геоэлектрического разреза [3]. Можно сказать, квадратурные системы не выдержали конкуренции одновременно с мощными Time-Domain системами и буксируемыми частотными. Казалось бы, для них уже не осталось места под солнцем, однако они долгое время продолжали использоваться в задачах геофизического картирования, благодаря тому, что: во-первых, в отличие от мощных Time-Domain систем, могли с успехом применяться в районах, сложенных плохо проводящими породами, а во-вторых, благодаря высокому расположению передатчика, позволяли выполнять региональную съемку с увеличенным расстоянием между маршрутами. К концу 90х в мире осталась единственная реально используемая квадратурная система – ДИП-4А [4].

Разработан новый вариант частотной разнесенной системы – комплекс EM4H.

Основной задачей разработки стало повышение качества и точности измерений, и технологичности съемки, а также расширение возможностей квадратурной системы на решение поисковых задач в широком диапазоне геоэлектрических условий, в том числе и применительно к поиску мощных проводящих рудных объектов. В ходе разработки были получены важные технические результаты:

- была достигнута не только высокая чувствительность, но также точность и стабильность измерительных характеристик широкополосного трехкомпонентного векторного приемника благодаря применению высокоточной цифровой регистрации и вычислительной обработки сигналов, а также специальных методов непрерывной амплитудно фазовой калибровки и стабилизации
- за счет применения дополнительных источников поля и специальных алгоритмов [5] удалось добиться высокоточного контроля геометрических параметров разнесенной установки передатчик-приемник. Контролируется не только расстояние между приемником и передатчиком, но также значения углов их взаимной ориентации.
- была достигнута возможность определения не только квадратурной, но и синфазной компоненты сигнала отклика. Принципиально эта возможность для плохо проводящего разреза известна давно [1], здесь же, благодаря использованию системы контроля геометрии, удалось получить решение и для действительной компоненты отклика от проводящих объектов.

Опыт применения системы EM4Н показал, что эти новые возможности существенно повлияли на качество решения геолого-геофизических задач, значительно расширив традиционные возможности частотных разнесенных систем. Освещению этих новых возможностей и посвящена данная работа.

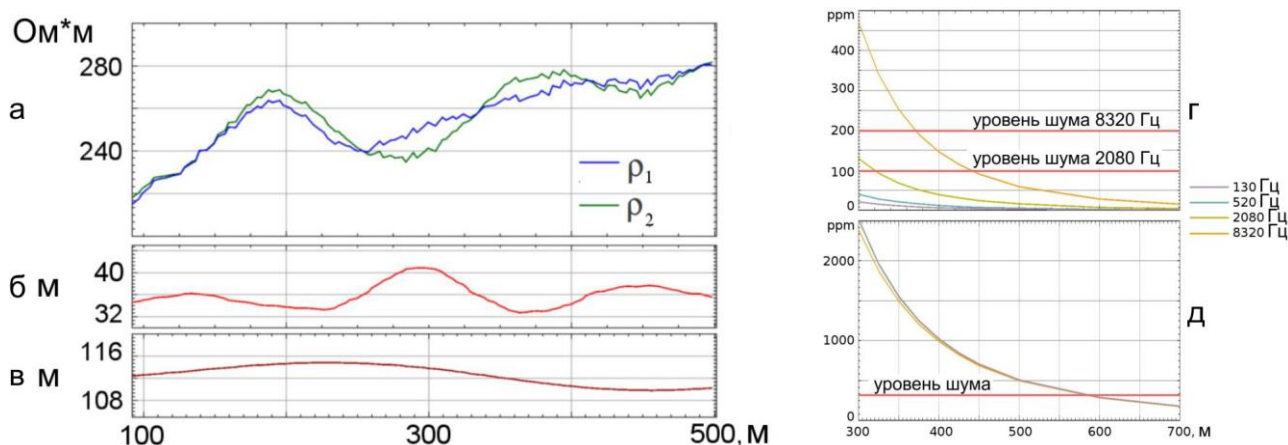


Рис. 1. (а-в) Результат подавления «геометрического шума»: а) кажущееся сопротивление, вычисленное с использованием истинного положения приемника (ρ_1) и используя осредненное значение (ρ_2); б) вертикальное расстояние между источником и приемником изменяет значение ρ_2 примерно на 10%; в) высота летательного аппарата – влияние на кажущиеся сопротивления отсутствует. (г-д) Результат моделирования откликов от двуслойного разреза (вода: 4 м, 12.5 См/м; основание: 10 мСм/м) на различных высотах для системы EM-4Н. г) Квадратурная компонента отклика – максимальная высота обнаружения 380 м. д) Синфазная компонента – максимальная высота обнаружения 600 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ.

Большие сомнения в эффективности применения классических квадратурных систем всегда были связаны с сильным влиянием «геометрического шума». Неконтролируемое изменение геометрических параметров в системе «передатчик-земля-приемник» традиционно приводило к существенным искажениям результатов измерений, вынуждая использовать при обработке низкочастотную фильтрацию и сглаживание, что негативно отражалось на детальности картирования.

В составе комплекса EM4Н используется встроенная система относительного электромагнитного позиционирования, которая позволяет после проведения необходимых калибровок точно определять параметры взаимного пространственного и углового положения

приемника и передатчика. С учетом этих параметров необходимые поправки могут быть введены в результаты электроразведочных измерений непосредственно, а также они могут быть использованы при последующей интерпретации. При этом влияние «геометрического шума» в значительной степени компенсируется.

Графики (Рис. 1) показывают эффективность подавления «геометрического шума» благодаря контролю геометрических параметров. Для одного и того же фрагмента данных значение кажущегося удельного сопротивления на одной из рабочих частот вычислено дважды: с учетом и без учета геометрических параметров установки – (а). Для оценки степени влияния приведены также графики значений высоты передатчика над землей – (б) и разности высот передатчика и приемника, измеренные системой относительного позиционирования – (в). Хорошо видно, что негативное влияние изменения геометрических параметров хорошо компенсируется введением соответствующих поправок.

Не менее важен контроль параметров взаимной угловой ориентации приемника и передатчика. Благодаря точному их определению удается в значительной степени снизить влияние естественных шумов. Этого удается добиться с помощью пересчета результатов измерений в значения вертикальных проекций вектора отклика. Помехи, обусловленные ионосферным сигналом, влиянием дальних и ближних гроз, преимущественно наблюдаются в горизонтальных направлениях, и в результате такого пересчета оказываются существенно подавлены.

Другим предубеждением против использования квадратурных систем традиционно считалась невозможность вычисления параметров синфазной компоненты отклика, что, в свою очередь, существенно снижало эффективность поиска хорошо проводящих объектов, а также вызывало сложности интерпретации результатов, полученных при съемках в районах с мощным развитием средне проводящих четвертичных отложений. Принципиальная возможность и метод косвенного определения действительной компоненты сигнала отклика были показана Palacky [1], однако на практике оказывались невозможными при высокой проводимости геоэлектрического разреза. Благодаря контролю геометрии установки и высокой стабильности амплитудно-фазовых характеристик удалось получить решение и для этих условий.

Рисунки (Рис. 2) показывают эффективность системы EM4Н применительно к задаче обнаружения проводящего объекта, в качестве которого выступает соленое озеро (удельное электрическое сопротивление = 0.08 Ом*м). Для оценки был проведен специальный эксперимент – съемка озера при разных высотах полета. Для заданных параметров объекта ($\rho_1 = 0.08 \Omega m, h_1 = 4m; \rho_2 = 200 \Omega m$) был выполнен расчет уровня сигналов (рис. 1) действительной (г) и мнимой (д) компонент при разных значениях высоты полета. Хорошо видно, что эффективность при измерениях полного вектора отклика существенно выше, чем при измерении только квадратурной компоненты. Фактические результаты (приведены на рис. 2 а-г) хорошо соответствуют предварительным расчетам. Важны и сами параметры: при высоте, меньшей 500 м уверенно определено значение кажущегося удельного сопротивления.

Различные типы аэроэлектроразведочных систем оказываются по-разному эффективными при решении различных геологических задач, важным классом которых является получение дополнительной информации о строении исследуемого района работ, уточнение геологических карт. Для работ такого рода успешно применяются мощные установки с буксируемым приемником (MEGATEM, GEOTEM). Здесь, однако, важно заметить, что указанные системы оказываются малоэффективными при работах на участках, сложенных плохо проводящими породами.

В свете рассмотренных особенностей комплекс EM4Н оказывается весьма эффективным при решении картировочных задач на участках с повышенным удельным сопротивлением.

Определение полного значения вектора отклика существенно повысило эффективность интерпретации данных системы EM4Н. Достаточно сказать, что благодаря этому стало возможным использование широкого арсенала классических методов интерпретации результатов измерений. В частности, структура полученной информации оказалось достаточной для интерпретации средствами комплекса программ AirGeo.

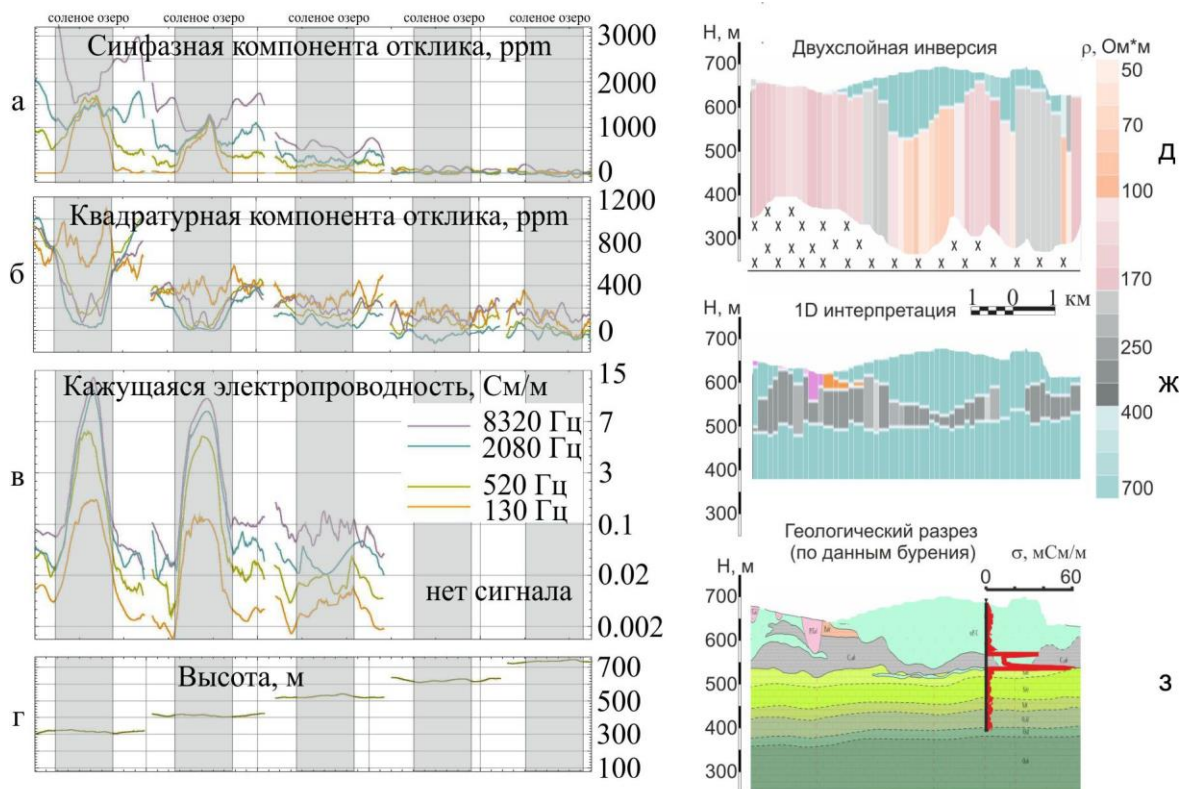


Рис. 2. (а-г) Чувствительность системы EM4N над соленым озером (выделено серым): полетные данные на различных высотах. а) Синфазная компонента отклика; б) Квадратурная компонента отклика; в) Кажущиеся электропроводности: озеро не определяется на высоте 500 м, на высоте 600 м отклик от земли неотличим от уровня шума; г) Высота. Цвета частотных каналов с рис.1 сохранены. (д-ж) Интерпретация данных системы EM-4N: д) 2 слойная инверсия; ж) 1D интерпретация; з) геологический разрез с данными каротажных исследований методом кажущихся сопротивлений (красная кривая)

Главный вывод из приведенных результатов – квадратурных систем в чистом виде в мире больше не осталось. Но это не означает, что частотные разнесенные системы доживают последние дни. Они не только продолжают существовать, но технически совершенствуются и являются незаменимыми при решении широкого круга поисковых и картировочных задач.

Кроме того, важно отметить универсальность технических результатов, полученных при разработке комплекса EM4N – алгоритмов и методов стабилизации измерительных характеристик, контроля геометрических параметров. Представляется, что их применение в аэроэлектроразведочных установках других типов также приведет к повышению их поисковой эффективности.

1. Palacky, G.J. and West, G.F., 1991, Airborne electromagnetic methods: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics – Applications, Society of Exploration Geophysicists, 811-879.
2. Fountain, D., 2008, 60 Years of airborne EM — Focus on last decade: AEM-2008 — 5th International Conference on Airborne Electromagnetics, 1-1.
3. Smith, R., Koch, R. and Hodges G., 2008, A comparison of broadband GEOTEM, TEMPEST and RESOLVE airborne electromagnetic data with ground resistivity data over the Midwest Deposit: AEM-2008 — 5th International Conference on Airborne Electromagnetics, 7-5.
4. Петров С.И., Новак В.Д., Тихомиров О.А., 2006, Аэроэлектроразведка методом ДИП-А — Разведка и охрана недр. № 5. С. 38-42.
5. Pavlov, B.V., Volkovitsky, A.K. and Karshakov, E.V., 2010, Low frequency electromagnetic system of relative navigation and orientation: Gyroscopy and Navigation, v.1 No.3, 201-208.