

Учет параметров индуктора и приемников в БАС μ ЗСБ при решении рудных и инженерных задач

А.В. Куклин* (АО «ЕМ-Разведка»), Г.М. Тригубович (АО «ЕМ-Разведка»), А.В. Чернышев (АО «ЕМ-Разведка»).

Введение

В настоящее время основная область применения БАС в поисково-оценочной электроразведке – μ ЗСБ, самая верхняя часть разреза от первых метров до 100 м. Использование относительно малых, легких приемно-генераторных конструкций (ПГК), близко расположенных измерительных антенн и индуктора требует высокого уровня оценки их взаимодействия. За счет возможности сближения с поверхностью земли увеличиваются поляризационные эффекты, которые следует использовать как дополнительный критерий выделения поисковых объектов. Нарастают проблемы учета собственных процессов выключения первичного поля индуктора, геометрии приемно-генераторных конструкций и т.п.

Таким образом, в БАС- μ ЗСБ существует значительное количество специфических проблем, без решения которых нельзя рассчитывать на высокое качество геофизического прогноза. В частности, для корректного извлечения информации в микросекундном масштабе времен требуется детальный учет формы зондирующего импульса и амплитудно-частотных характеристик ПГК.

Согласование параметров приемно-генераторной конструкции с ожидаемым откликом среды

Проектирование системы наблюдения является важнейшей частью рациональной методики работ, которая, при разумных затратах в рамках существующих электро-физических предпосылок, обеспечивает достоверный геофизический прогноз. Обычно, при постановке задачи для электроразведки указывается глубина исследования. Далее, исходя из априорных сведений об электрических свойствах среды и целевого объекта, определяется необходимый магнитный момент индуктора и измерительных датчиков. Однако любой способ увеличения магнитных моментов ПГК за счет увеличения площади конструкции и количества витков приводит к смещению АЧХ индуктора и измерителей в низкочастотную область, что должно быть учтено не только в дальнейшей интерпретации, а также и при проектировании, следует оптимизировать поисковую систему, согласовав спектры излучателя и приемника с ожидаемым спектром отклика среды или поискового объекта.

Задача согласования заключается в подборе таких параметров ПГК, чтобы регистрируемый отклик среды $\varepsilon(t)$ был максимально близок к её отклику $h(t)$ на нормированное внешнее импульсное ступень-образное воздействие при идеальной системе регистрации, в диапазоне времен/частот проявления целевого объекта.

На практике воздействие на среду осуществляется импульсом тока с фронтом спада $I(t)$, отличным от функции Хевисайда, а регистрация отклика проводится приемной антенной, имеющей импульсную характеристику $g(t)$. Следовательно, регистрируемый сигнал $\varepsilon(t)$ представляется в виде свертки:

$$\varepsilon(t) = (I * w * g)(t),$$

где w – импульсная характеристика изучаемой среды, связанная с переходной характеристикой $h(t)$ соотношениями:

$$w(t) = \frac{dh(t)}{dt}; h(t) = \int_0^{\infty} w(t) dt.$$

Таким образом, задача согласования – приблизить $\varepsilon(t)$ к $h(t)$.

На практике, и индуктор и приемник могут быть представлены фильтрами нижних частот по отношению к сигналу отклика исследуемой среды и для восстановления ее параметров приемно-передающая система должна быть согласована по частотному спектру передаточных функций всех её компонент.

Задача согласования ПГК с откликом поискового объекта является многофакторной и не стандартизированной, но обычно она содержит следующие базовые пункты:

- Электро-физическая модель среды. В простейшем случае – слоистая модель вмещающей среды с 3D объектом. Достаточно провести осесимметричное моделирование и определить диапазон времени значимого проявления поискового объекта – это *информативный диапазон времен, который должен быть зарегистрирован без искажений*. На основе этих данных определяется тип и параметры (размеры, число витков, ток) индуктора и требуемый момент приемной антенны.
- Оценивается верхняя частота спектра по времени начала проявления поискового объекта t как $f \geq 1/t$.
- Выбирается тип и размеры приемной антенны с достаточным магнитным моментом, и частотой среза выше, чем верхняя частота проявления объекта, позволяющую с минимальными искажениями передать верхнюю часть спектра отклика среды.

Согласование и учет фронта выключения тока

Фронт выключения тока является интегральной характеристикой излучающей системы, включающей в себя коммутатор тока, кондуктор, генераторный контур и (опционально) компенсатор.

Рассмотрим влияние длительности фронта выключения тока на аномальный сигнал от проводящего слоя толщиной $\Delta H = 1$ м, $\rho = 10$ Ом·м, расположенный на глубине $H = 5$ м в однородном полупространстве, $\rho = 100$ Ом·м. БАС система «воздух – воздух», высота траектории полета – 20 м.

На рисунке 1 приведены относительные аномальные сигналы от вышеуказанного слоя, рассчитанные с разными фронтами выключения тока. Шифр 0 указывает на сигнал от ступенчатого выключения тока (Хевисайд). Как видно, система с длинным фронтом выключения плохо согласована с характеристиками изучаемого слоя – аномалия от него мала и существенно сдвинута в поздние времена. Система с фронтом 2.5 мкс хорошо согласована с моделью среды – аномалия изучаемого слоя практически совпадает с таковой при расчетах на «Хевисаиде».

Независимо от степени согласованности фронта тока с исследуемой средой, требуется **регистрация полной формы импульса тока** для его учета при интерпретации. Попытки интерпретации сигналов без учета формы импульса тока приведут к искаженным характеристикам среды.

Зачастую используется простейший способ учета фронта выключения импульса тока – сдвиг сигналов в область ранних времен на время значимого влияния тока в ГП, однако такой способ не может учесть сложную форму фронта спада тока и наличие остаточных микротоков в

источнике поля, что приводит к ошибкам интерпретации ранних времен становления. Кроме того, такой способ псевдоучета импульса тока не учитывает длительность импульса и фронта его включения, что приводит к ошибкам интерпретации поздних времен становления.

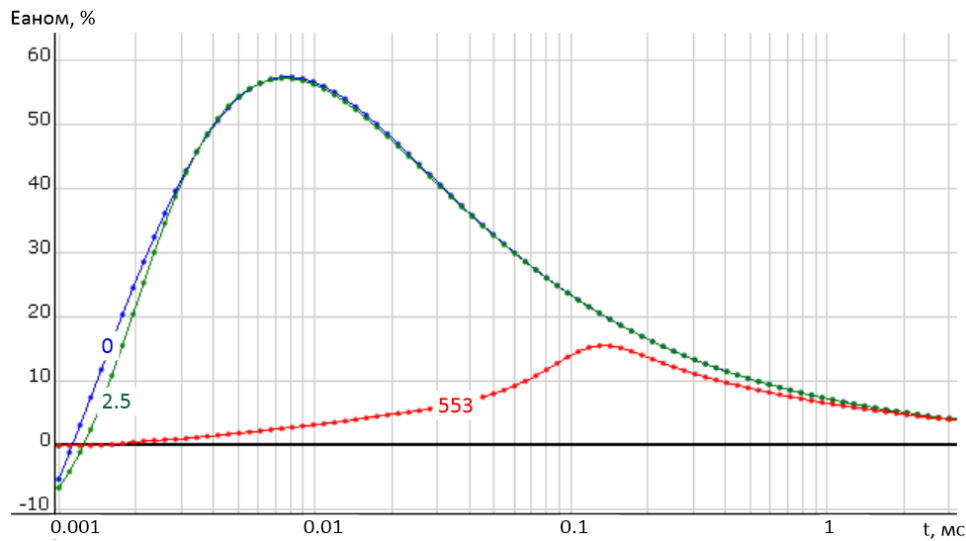


Рисунок 1. Графики аномального сигнала метрового слоя, $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, заглубленного на 5 м относительно однородного полупространства $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, в %. Шифр графиков – длительность фронта спада тока, мкс.

Учет распределенных параметров приемной антенны

Рассмотрим влияние приемной антенны на аномальный сигнал от проводящего слоя толщиной описанного в предыдущем разделе.

На рисунке 2 показаны графики аномального сигнала проводящего слоя относительно сигнала вмещающего полупространства, в %, рассчитанные для трех приемных антенн, различающихся полосой пропускания: ∞ – идеальный приемник, 160 кГц; 10 кГц.

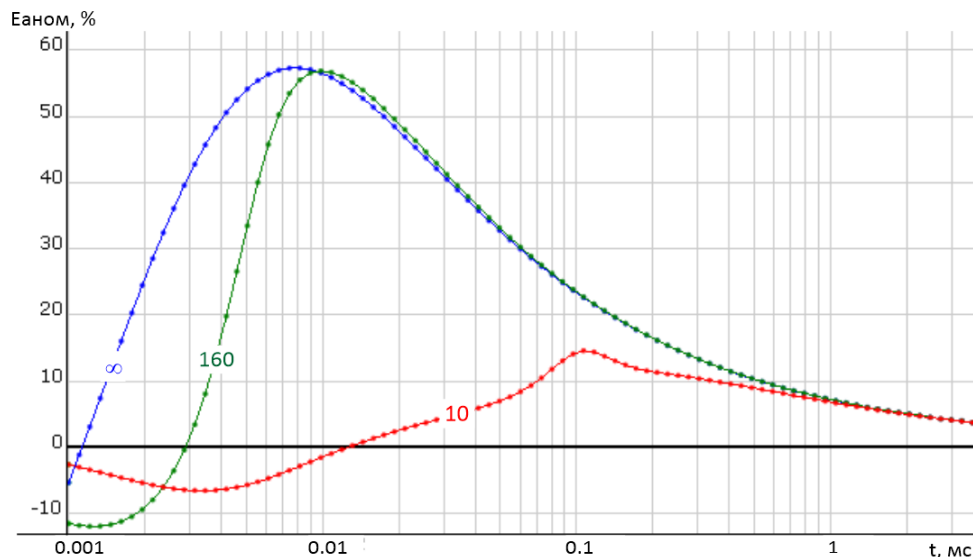


Рисунок 2. Графики аномального сигнала метрового слоя, $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, заглубленного на 5 м относительно однородного полупространства $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, в %. Шифр графиков – полоса приемной антенны, кГц

Как видно из рисунка 2, приемная антенна с полосой 10 кГц плохо согласована с характеристиками изучаемого слоя – аномалия от него составляет примерно 15% против 57% при идеальной приемной антенне, при этом максимум отклика среды существенно сдвинут в поздние времена – максимум аномалии отмечаем на 110 мкс против 7 при идеальной приемной антенне. Антенну с полосой 160 кГц можно считать хорошо согласованной, аномалия от слоя составляет 56%, время максимума – 9 мкс. При этом, несмотря на хорошую согласованность с изучаемой средой, при **проведении интерпретации требуется выполнять учет параметров приемной антенны.**

Если учет параметров индуктора производится с использованием измеренного фронта спада тока, то учет параметров приёмника удобнее производить в «аналитическом» виде, с использованием распределенных параметров, которые измеряются единожды, при изготовлении приемной антенны. Для этого приемная антенна представляется в виде фильтра, имеющего индуктивность L , ёмкость C , сопротивление провода R_p и сопротивление шунта R_{sh} . Для такого фильтра передаточная функция в частотной области имеет аналитический вид:

$$H(j\omega) = \frac{G}{G + 1 + j\omega(T_1 + T_2) - \omega^2 T_1 T_2}$$

где $G = R_{sh} / R_p$, $T_1 = L / R_p$, $T_2 = CR_{sh}$. Таким образом, зная электрофизические параметры приемной антенны представляется возможным учесть искажения, вносимые ею в измеряемый сигнал.

Учет АЧХ приемной антенны в интерпретации состоит в умножении расчетного спектра отклика среды на передаточную функцию $H(j\omega)$ при расчете в частотной области или в свертке во временной области переходной функции от среды с переходной функцией приемной антенны.

Выводы

При проведении исследований БАС- μ ЗСБ при решении инженерных задач требуется не только согласование частотных характеристик ПГК с предполагаемыми характеристиками поискового объекта, но и детальный их учет при проведении интерпретации зарегистрированного вторичного отклика среды.

Учет параметров излучателя производится путем регистрации интегральной характеристики системы коммутатор-индуктор – полного импульса тока, включая его «передний» и «задний» фронты.

Учет параметров приемника производится в «аналитическом» виде, с использованием известных распределенных параметров приемной антенны.

Библиография

1. Абрамов М.В., Барсуков С.В., Еременко С.И., Касторных В.С., Куклин А.В., Тригубович Г.М., Чернышев А.В. Беспилотные аэрогеофизические системы БАС – μ ЗСБ. Методические рекомендации для специалистов геофизических специальностей (Под ред. проф. Г.М. Тригубовича). АО «ЕМ-РАЗВЕДКА», 2025 г.

References

1. Abramov M.V., Barsukov S.V., Eremenko S.I., Kastornykh V.S., Kuklin A.V., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. Unmanned aerial geophysical systems UAV- μ TEM (edited by prof. G.M. Trigubovich). JSC “EM-SURVEYS”, 2025.