

Что и как «видит» георадар

Перед Вами два профиля, снятые на одной и той же трассе, проходящей над двумя металлическими газовыми трубами диаметром 400 мм, на глубине, 3.1 и 3.4 м, и прямоугольным бетонным лотком с кабелями на глубине 2.7 м.

Первый профиль (Рис. 13) – измеренная по трассе с помощью флюксметра вертикальная компонента электрического поля на высоте 1.2 м. от земли. Это то самое поле, на которое реагирует лозоходец. Реакция оператора-лозоходца здесь не приведена, поскольку, если честно признаться, не знаю, как это сделать: метрологию Н.Н. Сочеванова не осваивал. Могу только сказать, что реакция лозоходца, если он движется с постоянной скоростью, пропорциональна производной приведенной функции поля, плюс какой-то «порог», когда сигнал превышает определенное значение, и рамка начинает вращаться. Во всяком случае, над всеми тремя объектами реакция лозоходца явно выражена (Здесь в роли лозоходца выступал автор).

На приведенном графике трем объектам соответствуют три экстремума приземного электрического поля. Сравнивая эти результаты с теоретическими кривыми рис. 3 и рис. 4, можно видеть, что напряженность поля над трубами соответствует подземному объекту с повышенной проводимостью, а над лотком с кабелями – с пониженной.

С точки зрения информативности, данные лозы и флюксметра примерно одинаковы, поскольку в обоих случаях результатом является функция одной переменной – расстояния по трассе. Измерения флюксметра более объективны, поскольку не зависят от опытности оператора, его настроения, желания (или нежелания) сфальсифицировать результат, здоровья, а также, не исключено, от цены на дрова в бухте Тикси.

На рис. 14 приведен еще один профиль, цель которого, как и всей книжки в целом, отвлечь Вас от лозоходчества, играя на руку церкви и геофизике, но зато привлечь к геолокации. (Русская православная церковь и геофизика очень неплохо относятся к георадару и у нас есть богатый опыт сотрудничества с обеими).

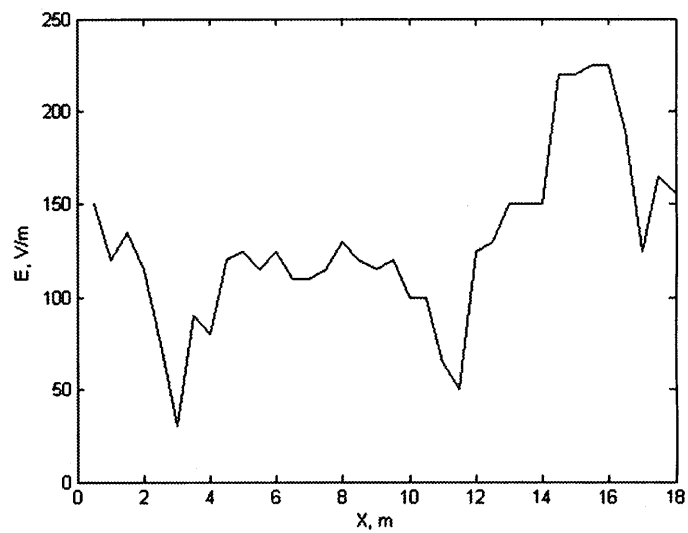


Рис. 13. Электрическое поле вдоль трассы.

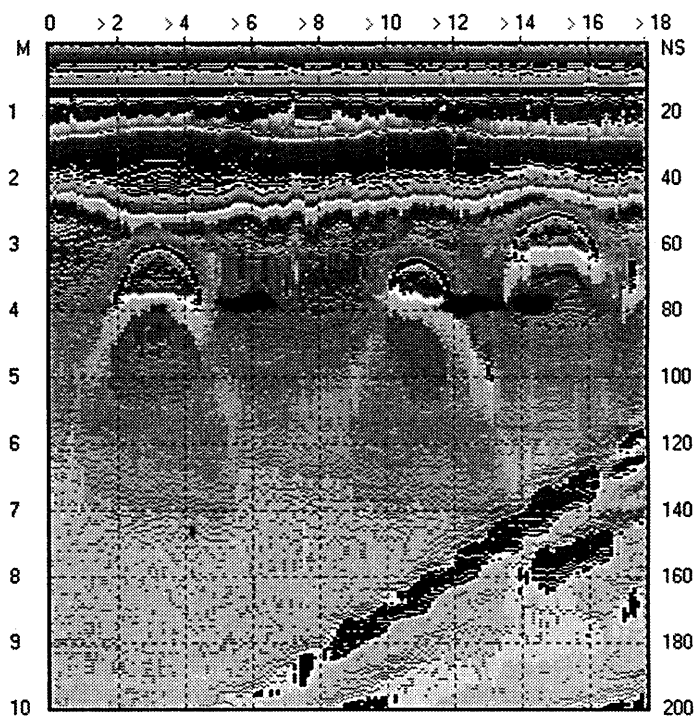


Рис. 14. Гео-
радарный про-
филь трассы.

На рисунке видны не только трубы и лоток, но и структура слоев почвы.

Если кратко и общими словами – георадар может все, что может лоза, плюс еще очень многое, поскольку его данные – функция двух переменных: расстояния по трассе, как при лозоходчестве, и времени прихода сигнала, связанного с глубиной расположения объекта.

Георадар – это сверхширокополосный радиолокатор, который излучает под землю короткий радиоимпульс с длительностью в единицы-десятки наносекунд, имеющий всего одно колебание электрического поля. Хотя радиоволна – это электромагнитное колебание, в котором существует как электрическая, так и магнитная компонента, мы далее будем чаще говорить об электрической, поскольку основное взаимодействие радиоволны со средой происходит именно через нее.

Параметры среды, которые влияют на электрическую компоненту – это диэлектрическая проницаемость и проводимость – те же самые характеристики, что определяют распределение в приземном слое электростатического поля, и, в конце концов, реакцию лозоходца.

Магнитное поле радиоволны взаимодействует со средой, как и магнитное поле Земли, через магнитную проницаемость, поэтому и здесь прослеживается аналогия с лозоходчеством, правда, заметное взаимодействие происходит довольно редко, в основном на пластах с большим содержанием железа, и по этой причине в волновом уравнении обычно не рассматривается.

В однородной подземной среде волна распространяется со скоростью меньшей, чем в воздухе. Ее скорость уменьшается в $n = \sqrt{\epsilon}$ раз.

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (32)$$

Из обычных природных сред наибольшее замедление наблюдается у воды – в 9 раз по отношению к воздуху (для воды $\epsilon = 81$).

На границе раздела двух сред с разной диэлектрической проницаемостью, волна частично отражается и идет назад, к приемнику, а оставшая часть продолжает распространяться вперед, до тех пор, пока не отразится от очередной границы, или не затухнет. Для гео-

радары все среды, кроме металла, полупрозрачны, поэтому разделяющие их границы наблюдаются на профиле одновременно.

Коэффициент отражения от границы двух сред имеет вид:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (33)$$

Коэффициент прохождения

$$T = \frac{2\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (34)$$

Коэффициент прохождения всегда положителен, в то время как коэффициент отражения может быть знакопеременным. Это означает, что прошедшая через границу волна не меняет свою полярность (фазу). Отраженная волна остается в фазе с зондирующим им-

пульсом, если $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ (отражение от потолка подземного хода, от дна водоема) в противном случае отраженный импульс меняет свой знак по отношению к зондирующему (отражение от металлической трубы, от влагонасыщенного слоя). Знак сигнала не зависит от того, каков был его знак при отражении от вышележающей границы и может анализироваться независимо.

Георадар регистрирует время распространения импульса до границы и обратно, глубина залегания ее связана с зарегистрированным временем через скорость распространения волны, которая может меняться почти в 10 раз. Во столько же раз, теоретически, можно ошибиться в глубине залегания границы, если не знать диэлектрическую проницаемость слоя.

Чаще всего диэлектрическая проницаемость лежит в районе 10 единиц, поэтому скорость радиоволны в среднем в три раза ниже, чем в воздухе. Это значение скорости, если нет задачи точного определения глубины залегания объекта, как показывает практика, дает ошибку по глубине не более 10 процентов.

Но существуют методики точного определения глубины при профилировании, когда георадар перемещается как единое целое (штатный режим), если отражающий объект локализован в пространстве: кабель, газовая труба, траншея, камень и т.д. Вокруг объекта

возникают гиперболы, по которым можно вычислить как истинную глубину его залегания, так и диэлектрическую проницаемость вмещающего слоя. Возникновение гипербол вокруг локальных отражателей объясняется наличием конечной диаграммы направленности антенн по углам излучения. Когда мы движемся по трассе, то «боковым зрением» начинаем видеть предмет немного раньше, чем для точки профиля, которая находится над ним, это и есть причина возникновения гипербол. На рис. 14 они хорошо видны.

Для плоских геологических границ, где нет локальных отражателей, и, поэтому, нет гипербол, используется специальный метод определения истинной глубины границ и диэлектрической проницаемости слоев – метод зондирования, или метод построения годографа.

При зондировании передатчик и приемник разъединяются и перемещаются в противоположных направлениях. Возникает годограф – зависимость времени задержки сигнала от расстояния между передающей и приемной антенной. Годограф – это тоже гипербола, и уже по ней можно определить интересующие параметры.

В литературе упоминается об обнаружении лозоходцами рудных тел до глубин в 700 метров и более. Возможно ли достижение таких глубин георадаром?

К настоящему времени с помощью георадара «Лоза» мы фиксируем глубины в 250 метров. Это соответствует максимальной задержке отраженного сигнала в 4 нс, на которую был рассчитан прибор. Сейчас проводится его модернизация с целью увеличения регистрируемых задержек.

Рассмотрим теорию распространения радиоволн, которая может дать ответ на вопрос, какие глубины достижимы георадаром, и как это можно осуществить.

Волновое уравнение для электрической компоненты в среде с диэлектрической проницаемостью ε и проводимостью σ выглядит так:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (35)$$

Здесь $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ – скорость света в вакууме.

Проводимость среды σ присутствует в волновом уравнении (35) как коэффициент перед первой производной по времени, которая определяет диссипацию (поглощение) волновой энергии. Собственно говоря, диссипативный член и ограничивает все возможности подземной радиолокации, включая глубину зондирования и пространственное разрешение (при $\sigma = 0$ радиоволны в среде не затухают, а это означает возможность достичь любой глубины и любого разрешения).

Для выяснения особенностей распространения радиоволн в проводящей среде перейдем из временной области в частотную, поскольку это упрощает дальнейшие расчеты. С этой целью решение волнового уравнения (35) будем искать в виде затухающей монохроматической волны

$$E = \exp(-px - ikx + i\omega t) \quad (36)$$

Здесь p – коэффициент затухания, k – волновое число, ω – круговая частота.

Подставим (36) в исходное уравнение (35) и получим новое уравнение, связывающее параметры волны с проводимостью среды σ .

$$p^2 - k^2 + 2ipk + \frac{\epsilon\omega^2}{c^2} - i\omega\mu_0\sigma = 0 \quad (37)$$

Приравнивание нулю действительной и мнимой частей (37) приводит к биквадратному уравнению

$$p^4 + \frac{\epsilon\omega^2}{c^2} p^2 - \frac{\omega^2 \mu_0^2 \sigma^2}{4} = 0 \quad (38)$$

Решение уравнения (38) записывается как

$$p = \sqrt{-\frac{\epsilon\omega^2}{2c^2} + \sqrt{\frac{\epsilon^2\omega^4}{4c^4} + \frac{\mu_0^2\sigma^2\omega^2}{4}}} \quad (39)$$

Знаки перед корнями выбраны из условия физической реализуемости результата.

В области низких частот (для подмосковных почв – меньше 20 МГц) коэффициент затухания выражается формулой

$$p = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma \omega}{2}} \quad (40)$$

Затухание зависит от частоты и при ее снижении может быть сколь угодно малым.

Полученный результат говорит о том, что с точки зрения распространения радиоволн, теоретического предела глубины проникновения волны в грунт не существует. Проводимостью мы управлять не можем, она-то как раз и подлежит определению, но снижать центральную частоту зондирующего импульса в состоянии. Это делается путем увеличения длины антенны. Затухание в среде может также компенсироваться наращиванием мощности передатчика. На этом пути у георадиолокации еще далеко не все возможности исчерпаны.

Увеличение длины антенны приводит к расширению по времени зондирующего импульса, а когда объектов много, и все они расположены достаточно близко друг к другу, импульс начинает накладываться на соседние, ухудшая разрешение.

Но в геологии, например, нефтеносных или газоносных пластов, границы располагаются достаточно далеко друг от друга, и здесь точность их регистрации зависит не только от частотного диапазона, а в значительной степени от мощности передатчика. Это становится понятным, если принять во внимание, что точность определения максимума функции зависит не только от ее «плавности», но и от соотношения сигнал/шум. При стремлении этого соотношения к бесконечности, точность становится сколь угодно высокой.

Нам однажды довелось испытывать уникально мощный передатчик.

В нашем государстве периодически возникает идея о конверсии – использовании опыта разработок военной техники в мирных целях. Помните старый анекдот о сенокосилке с вертикальным взлетом и посадкой?

Разработчик авиационной электронной бомбы, спускающейся на парашюте и выжигающей всю электронику противника, и не предполагал, что ее можно применить в мирных целях. О ее мощности он сказал очень туманно:

– Да кто же ее измерял? Все приборы «глючат». Тем более, что она сейчас лежит на земле. Могу только гарантировать, что в импульсе не менее полумиллиона вольт.

Обращаясь к П. Морозову:

– Это твоя машина? Угони-ка ее на дальнюю стоянку и приходи сюда пешком, а то возвращаться домой вам придется общественным транспортом.

– Если будете приближаться к передатчику ближе 100 метров, мы вам выдадим защитные костюмы.

Мы сказали, что этого нам не потребуется и что можно приступать к эксперименту.

Сигнал от бомбы был очень мощным. Он выходил из ограничения только к концу развертки. Регистрация глубин, которых он достигал, в нашем приборе предусмотрена не была. Методом экстраполяции, предполагая, что затухание радиоволн во всей подземной среде примерно такое же, как в первых сотнях метров, получили оценку глубины – шесть километров.