

# Сигналы георадара

Передатчик георадара Лоза излучает зондирующий импульс, показанный на рис. 23. Практически, это идеальный импульс для георадиолокации, и, насколько мы знаем, кроме нас, никто его не использует.

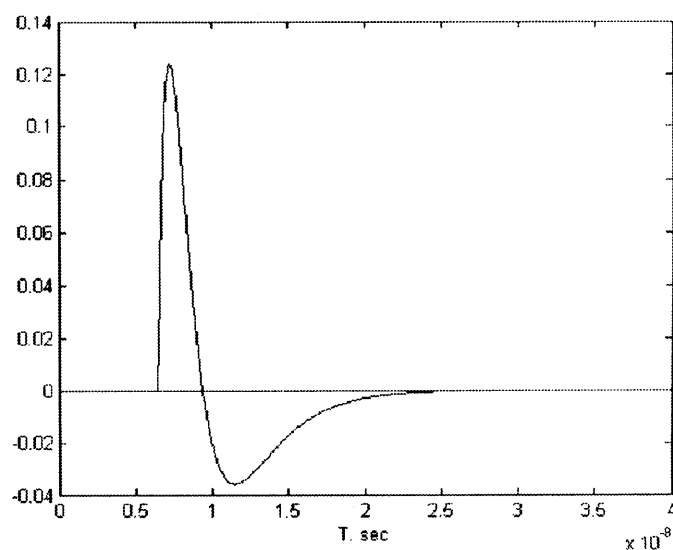


Рис. 23. Зондирующий импульс георадара Лоза.

Чтобы его получить, необходимо ввести искусственное затухание в антенную систему, т.е. часть мощности передатчика превратить в «бесполезное» тепло. Потенциал наших приборов, который примерно в 10000 раз превосходит все известные нам аналоги, позволяет это сделать без ущерба для решаемой задачи по глубине обнаружения подземных объектов и их разрешению, переводя количество в качество. Это стало возможным благодаря конструктивным особенностям нашего прибора, в котором основу передатчика составляет водородный разрядник высокого давления, коммутирующий напряжение 5000 Вольт, в то время как в других приборах используются лавинные транзисторы, коммутирующие напряжение 50 Вольт.

Обычно передатчики георадаров излучают импульсы другого типа (рис. 24): в отличие от нашего импульса, в котором отрицательная полуволна не пересекает нулевой уровень, а стремится к нулю асимптотически, оставаясь монотонной и отрицательной, сигнал на рис. 24 относится к осциллирующим, когда функция пересекает нулевой уровень бесконечное количество раз, хотя и со значительным ослаблением амплитуды последующих колебаний, образуя бесконечную серию экстремумов - минимумов и максимумов.

В радиолокации каждый экстремум принимаемой функции рассматривается как отражение от цели, и совершенно понятно, что использование сигнала осциллирующего типа (рис. 24) ограничивает возможности георадара: появляется большое количество ложных целей, усугубленное тем, что в георадиолокации из-за большого затухания сигнала приходится работать в очень большом динамическом диапазоне принимаемых амплитуд, когда необходимо на фоне очень мощных сигналов зафиксировать очень слабые.

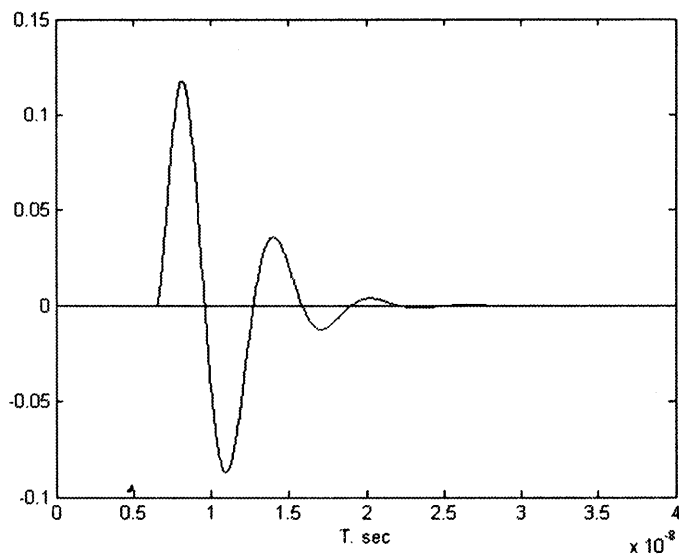


Рис. 24. Осциллирующий зондирующий импульс.

Зондирующий и отраженный неосциллирующий импульс (рис. 23) обязательно имеет как положительную, так и отрицательную полуволну. Первая полуволна - короткая по времени и имеет большую

амплитуду, вторая полуволна - широкая и имеет меньшую амплитуду, но интегралы (площади под ними) равны, поскольку антенны имеют конечный размер и не излучают радиоволны нулевых частот (постоянный ток). Исключение могут составлять сигналы от ближней зоны антенны и сигналы в проводящих средах, но мы с ними сталкиваться не будем.

В однородной подземной среде волна распространяется со скоростью меньшей, чем в воздухе. Ее скорость уменьшается в  $n = \sqrt{\varepsilon}$  раз ( $n$  - показатель преломления,  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость).

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

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

На границе раздела двух сред с разной диэлектрической проницаемостью, волна частично отражается и идет назад, к приемнику, а остальная часть продолжает распространяться вперед, до тех пор, пока не отразится от очередной границы, или не затухнет. Для георадара все среды, кроме металла, полупрозрачны, поэтому разделяющие их границы наблюдаются на профиле одновременно, образуя «слоеный пирог».

Коэффициент отражения от границы двух сред имеет вид:

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

Он может быть как положительным, так и отрицательным. Если  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ , когда волна падает из более плотной среды в менее плотную (в смысле оптической плотности, или показателя преломления), то коэффициент отражения имеет положительную величину, при  $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$  - отрицательную.

Например, на границе вода-лед коэффициент отражения положителен, а на границе лед-вода – отрицателен, поскольку для льда  $\varepsilon = 2.5 \div 3$ .

При положительном коэффициенте отражения форма отраженного импульса (полярность, фаза) остается прежней, при отрицательном – меняется знак импульса, он «переворачивается». Это служит признаком вида границы и может использоваться для оперативной оценки свойств слоев, прямо на месте съемки, без дополнительной математической обработки, с экрана георадара.

Этот закон электродинамики иллюстрируется рис. 25 и 26, на которых изображены зондирующий и отраженный импульсы.

Коэффициент прохождения всегда положителен, и влияет только на энергию сигнала, форма прошедшего сигнала остается прежней, как при его прохождении через границу сверху вниз, или снизу вверх.

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

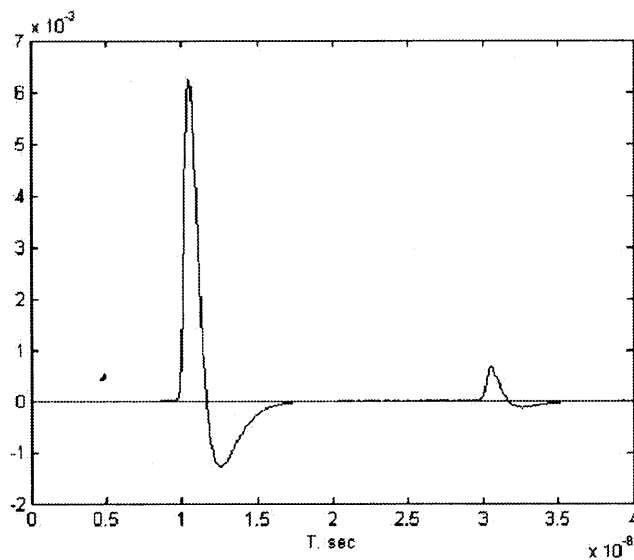


Рис. 25. Отражение от границы слоя с меньшей диэлектрической проницаемостью.

Этот факт позволяет каждую из отражающих границ анализировать на знак (форму, фазу) независимо от соседних границ между слоями.

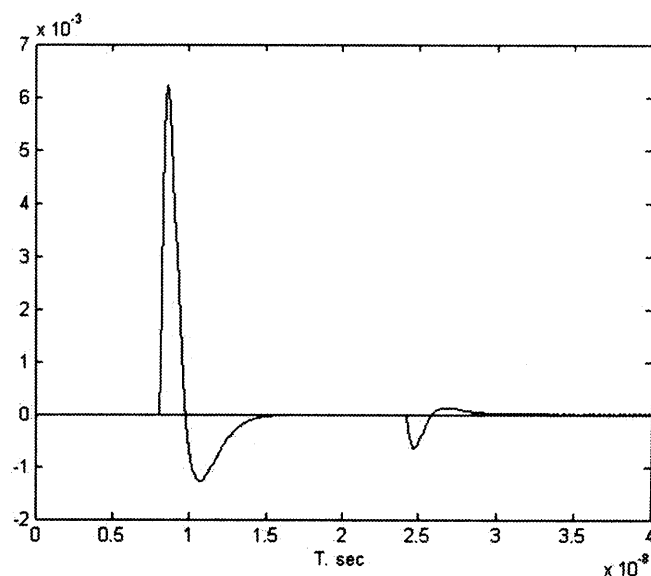


Рис. 26. Отражение от слоя с большей диэлектрической проницаемостью.

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 (для Подмосковья) 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 правило, 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 возни-

кают 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 из-за конечной диаграммы направленности антенны, составляющей десятки градусов, начинаем фиксировать предмет немного раньше, чем для точки профиля, которая находится непосредственно над ним, это и есть причина возникновения гипербол.

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 интересные параметры.

Структура принятых георадаром сигналов имеет следующий вид:

Первым на развертке фиксируется зондирующий импульс со своей предысторией. Он излучается передатчиком, который работает в асинхронном режиме. Когда приемник получает команду начала регистрации, он устанавливается в режим ожидания синхронизации, которая осуществляется по импульсу передатчика, пришедшего самым коротким путем — по воздуху. Такая система синхронизации вызвана тем, что классическая схема, когда передатчик запускается от внешнего генератора, в нашем случае практически не возможна — для управления разрядником нужен такой мощный синхроимпульс, что его наличие сняло бы вопрос о необходимости передатчика — с его ролью справилась бы сама система выработки синхроимпульса.

Система синхронизации требует определенное время на срабатывание, поэтому, чтобы зафиксировать зондирующий импульс с его предысторией, в канале регистрации сигнала предусмотрена линия задержки.

За зондирующим импульсом следуют отраженные от границ сигналы, которые, собственно, и представляют собой данные, определяющие георадарный метод. Это запись сигнала в зависимости от времени прихода, в нашем случае, через интервал в 1 нс. Время при-

хода сигнала зависит от глубины расположения границы в земле и скорости распространения радиоволны в данной среде. Например, в воздухе радиоволна распространяется со скоростью 15 см/нс, а в воде — 1.6 см/нс. (Здесь имеется ввиду так называемая радиолокационная скорость, которая в 2 раза ниже реальной. Эта скорость введена для удобства перевода регистрируемых задержек сигнала, проходящего двойной путь: туда и обратно.)

Глубина залегания границы, если она не плавная, характеризуется только одним параметром — ее конкретным значением. Мы же регистрируем функцию времени отраженного сигнала, и возникает вопрос, как положение границы (для начала — во времени) связано с этой функцией. Из многих возможных вариантов мы выбрали время задержки первого максимума, для чего вычисляется нулевой момент времени, в соответствии с принятым условием, по форме зондирующего импульса, пришедшего по воздуху. Для каждого сигнала за максимумом обязан следовать минимум, если сигнал пришел в фазе с зондирующим, или за минимумом — максимум, если отраженный сигнал пришел в противофазе. Но довольно часто мы вторую полуволну сигнала не фиксируем — она может наложиться на следующий сигнал, или просто не зарегистрироваться из-за недостаточной дискретизации амплитуды по уровням — для увеличения динамического диапазона мы используем нелинейное преобразование (компрессию) амплитуд, что приводит к большому шагу дискретизации для больших ее значений.

Мы отображаем величину положительной амплитуды насыщенностью красного цвета, а отрицательную — синего цвета. Эти псевдоцвета условны, они используются, например, при изображении высоты места над уровнем моря в географических картах. Отражающая граница привязана к максимуму первой полуволны отраженного сигнала, который может быть как положительным (красным), так и отрицательным (синим).

Приведенные пояснения позволят Вам рассматривать георадарные профили понимая, как радиолокационный образ соответствует реальной геометрии подземных слоев. Никакой дополнительной обработки принятых сигналов нами не производилось, кроме перевода временной шкалы в глубину по средней скорости. Среднюю скорость для приведенных профилей мы вычисляли для дна воронки.

Отсутствие какой-либо математической обработки радиолокационных профилей мы поясняем следующим образом:

1. «Картинки» очень «чистые» и легко «читаются» даже неподготовленными людьми. Они вполне решают поставленные нами задачи.

2. Точный перевод радиолокационного образа в геологическое сечение сложен и может привести к ряду дискуссионных вопросов, не касающихся рассматриваемой нами проблемы.

## Старый пенъ



Пень, обнаруженный на дне Сусловской воронки после ее осушения. Фото Е. Кринова, 1929 г.

Этот листовичный пенъ, обнаруженный в Сусловской воронке после спуска воды через прорытую в ее борту траншею, сыграл очень важную роль в изучении Тунгусского метеорита. Все дело в том, что пенъ был старым, стоял вертикально, у него сохранилась корневая система, а сам он находился в центре.

Это стало одним из самых весомых аргументов противников ударного происхождения воронки. Ход мысли прост: пусть даже мы не достигли дна воронки, а находимся на каком-то промежуточном