

Сигналы георадара в проводящих средах.

Радиоволны относятся к электромагнитным колебаниям, но не все электромагнитные колебания относятся к радиоволнам. Отличительным признаком радиоволны является наличие тока смещения. Этот ток введен в электродинамику Максвеллом, его плотность в вакууме определяется формулой:

$$\vec{J}_s = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1)$$

Здесь \vec{J}_s - плотность тока смещения, ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, \vec{E} - вектор напряженности электрического поля, t - время.

Примером тока смещения может служить прохождение переменного тока через конденсатор, между обкладками которого носителей заряда нет.

Плотность тока проводимости \vec{J}_p в среде, где есть носители заряда, определяется другой формулой:

$$\vec{J}_p = \sigma \vec{E}, \quad (2)$$

где σ - проводимость среды.

В законе полного тока, являющегося составной частью системы уравнений Максвелла, оба тока участвуют на равных правах:

$$\text{rot } \vec{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \quad (3)$$

Но в волновом уравнении, получаемом из системы электродинамических уравнений, они участвуют по-разному и определяют различные механизмы распространения электромагнитной энергии.

Волновое уравнение для напряженности электрического поля в

средах с проводимостью имеет вид:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

Здесь ε - относительная диэлектрическая проницаемость среды, μ_0 - магнитная проницаемость вакуума, c - скорость света.

Дифференциальное Уравнение в Частных Производных (4) (в студенческой терминологии «дурчап») имеет следы двух уравнений: уравнения Даламбера, в котором отсутствует первая производная по времени, и уравнения диффузии, в котором отсутствует вторая производная по времени. Эти уравнения являются классическими и подробно изучены.

Уравнение Даламбера описывает электромагнитные волновые процессы, в которых существуют только токи смещения. Это приближение для почв Подмосковья хорошо работает на частотах выше 50 МГц. Но с понижением частоты и/или с повышением проводимости начинают проявляться процессы, связанные с проводимостью среды и описываемые уравнением диффузии (или уравнением теплопроводности, которое имеет такой же вид). В геофизике процесс диффузии электромагнитного поля в проводящую среду используется в методе становления поля. Физические процессы, происходящие при диффузии, имеют другую физическую природу, и существенно (на порядки!) медленнее, чем радиоволновые.

Влияние проводимости проявляется в омическом поглощении (затухании) радиоволны и в появлении непосредственно за радиосигналом диффузионной компоненты в виде «хвостов» (или «тянучек»), процесс возникновения которых показан на рис. 12-15.

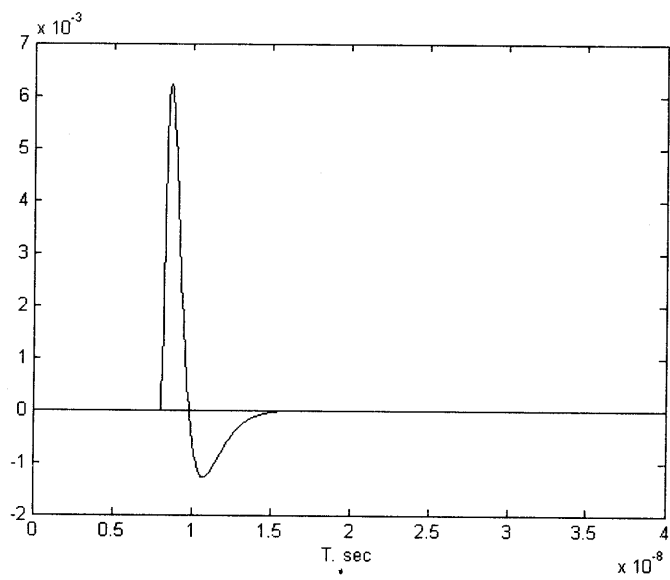


Рис. 12. Сигнал в среде без проводимости.

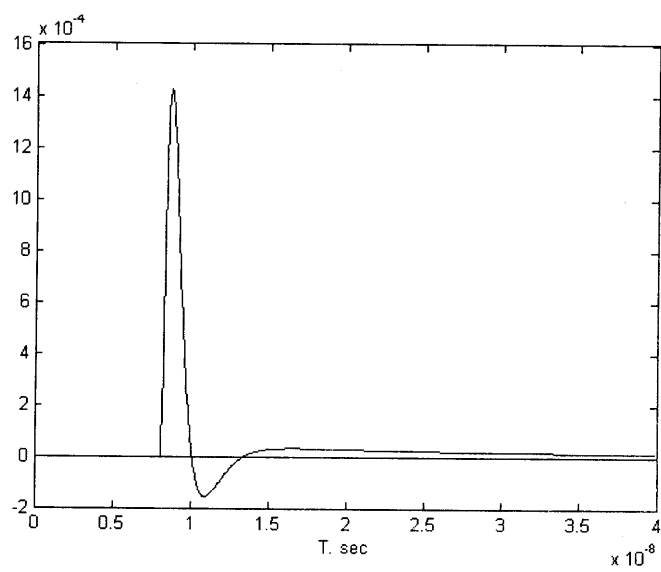


Рис. 13. Проводимость среды 0.02 Сим/м.

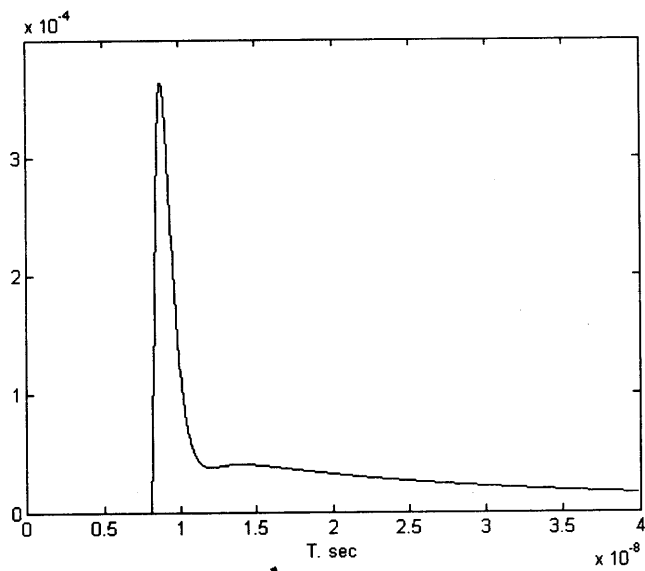


Рис. 14. Проводимость среды 0.04 Сим/м .

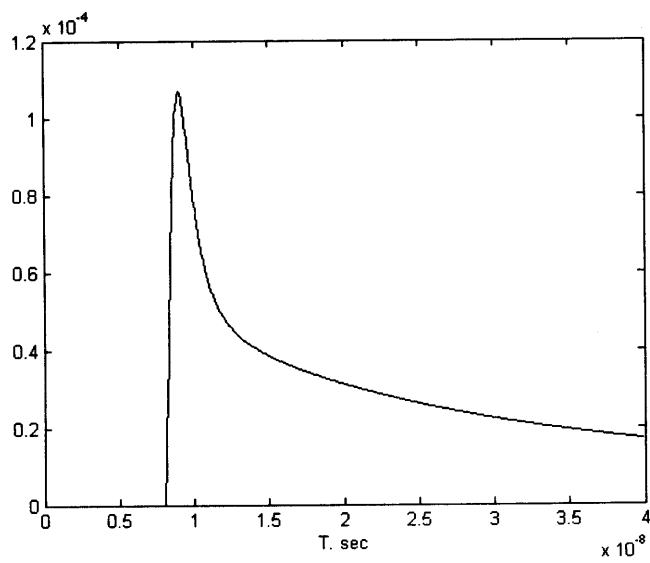


Рис. 15. Проводимость среды 0.06 Сим/м .

Диффузионный «хвост» сигнала имеет знак экстремума предшествующего ему радиосигнала. У симметричного радиосигнала, когда величина максимума и минимума одинакова по величине, «хвост» отсутствует.

«Хвост» имеет очень большую длительность (например, миллисекунды), и зафиксировать его весь целиком георадар не может из-за ограниченного времени приема, если бы даже входные цепи приемника пропустили его на вход регистратора. Но наши приемники по входу имеют фильтр верхних частот, который обрезает его на длительности около микросекунды. Поэтому мы фиксируем только начало «хвоста», имеющего истинную амплитуду, но функция спада сигнала для всех «хвостов» одинакова и определяется только частотными характеристиками аппаратуры, включая антенны.

Радио и диффузионные сигналы описываются линейным дифференциальным уравнением (4), для которого выполняется принцип суперпозиции: все они суммируются в соответствии со своим временем прихода. Это демонстрируют рис. 16-19.

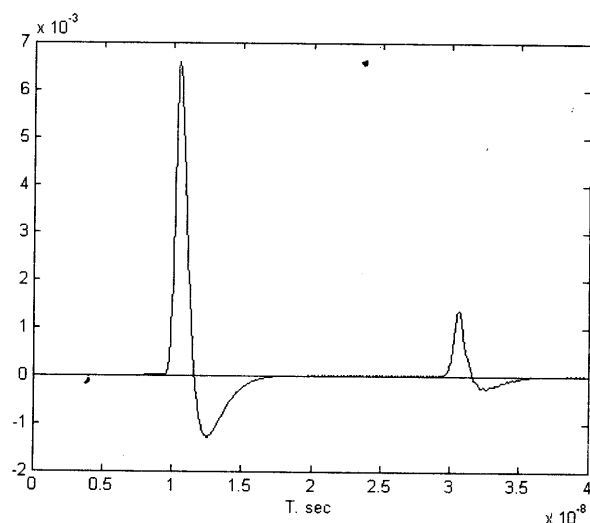
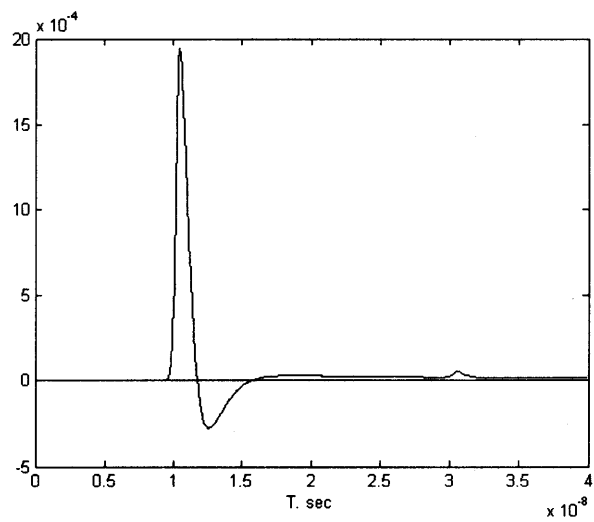
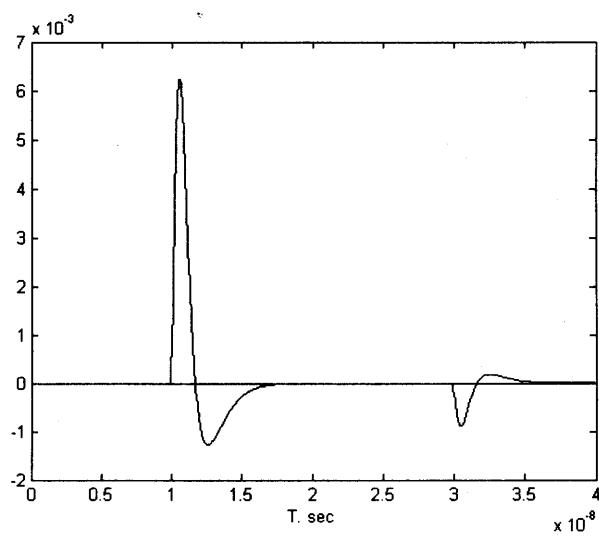


Рис. 16. $\varepsilon_1 = 9$ $\sigma_1 = 0$ $\varepsilon_2 = 4$ $\sigma_2 = 0$



Puc. 17. $\varepsilon_1 = 9$ $\sigma_1 = 0.01$ $\varepsilon_2 = 4$ $\sigma_2 = 0.01$



Puc. 18. $\varepsilon_1 = 9$ $\sigma_1 = 0$ $\varepsilon_2 = 16$ $\sigma_2 = 0$

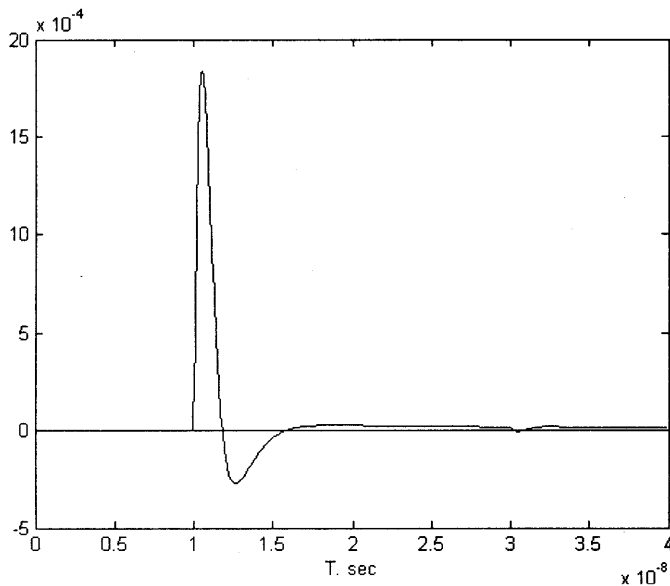


Рис. 19. $\varepsilon_1 = 9$ $\sigma_1 = 0.01$ $\varepsilon_2 = 16$ $\sigma_2 = 0.01$

Как видно из рисунков, на временное положение и форму радиосигналов, возникающих при отражении от границы двух сред, кроме амплитуды, проводимость слоев влияния не оказывает. В отличие от радиосигнала, диффузионный сигнал формируется не переходом между слоями, а всей толщиной слоев.

В георадиолокации возникновение «хвостов» само по себе не является каким-либо принципиальным препятствием для решения задач, хотя и говорит о том, что в среде повышена проводимость, которая приводит к повышенному затуханию радиоволн.

На фоне «хвостов» радиосигналы, если они есть, легко обнаруживаются.

Примером могут служить результаты обследования морского дна Таманского залива в наших работах по картированию Киммерийского вала. Морская вода и дно имеют очень высокую проводимость, приводящих к возникновению мощных диффузионных сигналов прямо в начале развертки. Но подбор порога бинарной регистрации на уровне величины этого «хвоста», позволил получить

результаты с очень хорошим разрешением по времени прихода радиосигнала, и, соответственно, по глубине.

В случае нашей аппаратуры «хвост» оказывает определенное негативное воздействие, поскольку он «подбрасывает» сигнал в область больших значений напряженности поля, где у нас чувствительность ниже, чем в области малых полей: из-за необходимости регистрировать сигнал в большом динамическом диапазоне мы применяем «компрессию» сигнала при больших его величинах. Этот недостаток может быть скомпенсирован АЦП с малым шагом дискретизации амплитуды.

Однако само наличие «хвостов» позволяет расширить возможности прибора: возникает принципиальная возможность определять проводимость геологических слоев.

При поисках Киммерийского вала на дне Таманского залива, мы пользовались магнитной передающей и приемной антенной, схема которой показана на рис. 20. Роль витков магнитной антенны выполняли распределенные в проводящей морской воде линии тока.

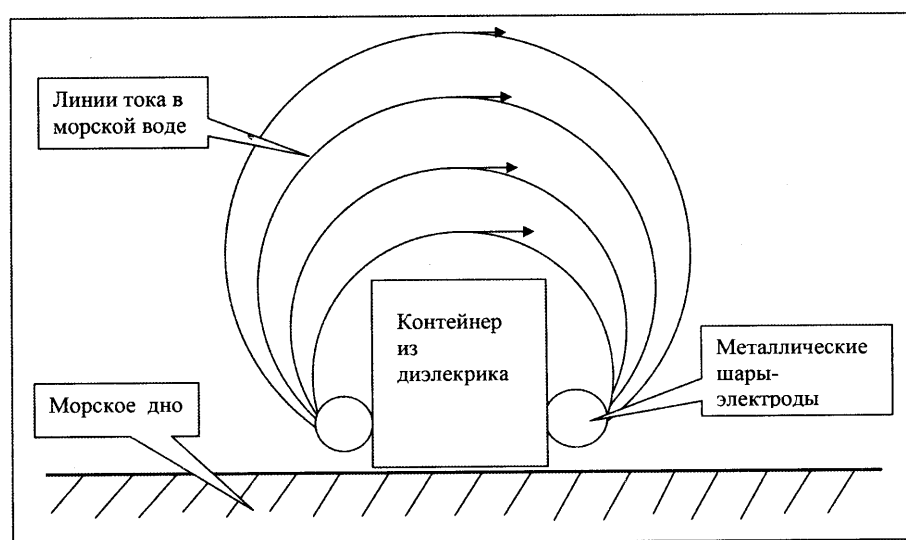


Рис. 20.

После каждого рабочего дня медные электроды антенны передатчика становились зелеными, а при его работе на шарах можно было заметить пузырьки кислорода и водорода — происходил электролиз воды. Электролиз не мешал проведению работ и получению нужных результатов, а проблему очистки электродов решали привлечением самой молодой части археологической экспедиции и наждачной бумаги.

Необходимо различать еще один вид «хвостов», которые следуют непосредственно за зондирующим импульсом, если передающая и приемная антенны находятся в ближней зоне друг друга. Эти «хвосты» не имеют ничего общего с теми, которые мы рассмотрели выше.

В ближней зоне, кроме радиоволновой компоненты, уходящей в пространство и спадающей по закону $1/r$, существуют квазистатические компоненты, сконцентрированные только возле антенны, и спадающие по закону $1/r^2$ и $1/r^3$.

Точного определения ближней зоны нет, она соизмерима с длиной волны. В нашем случае — это расстояние порядка размера самой антенны. Если квазистатический «хвост» мешает измерениям (обычно такое случается на малых глубинах), то приемную и передающую антенны следует удалить друг от друга. Сближение антенн ведет к увеличению глубины, но «замываются» сигналы с малых глубин. При сближении антенн следует помнить, что защита входных цепей приемника может быть сожжена мощным импульсом передатчика. Мы рекомендуем не сближать антенны менее, чем на 30 см. Мы обычно рекомендуем также сохранять расстояние между антеннами при профилировании равным размеру самих антенн.

Поляризация

Радиоволна имеет поляризацию — направление, связанное с положением в пространстве вектора электрического поля. Вектор магнитного поля перпендикулярен вектору электрического поля в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны. Для электрической дипольной антенны вектор поляризации направлен в пространстве параллельно диполю.

Направления относительно вектора поляризации для радиоволны не равнозначны, когда речь идет об отражающей способности предметов, в разных направлениях имеющих разную протяженность, т.е. анизотропных.

Самый простой пример – отражение от электрических проводов. Если встать с георадаром под проводами и вращаться вместе с антенной системой, то виден мощный отраженный сигнал, когда антенны параллельны проводам, и наблюдается полное его отсутствие, когда антенны им перпендикулярны.

Эту особенность радиоволн следует учитывать оператору при проведении георадарной съемки. Выбор правильной поляризации может существенно ослабить влияние поверхностных предметов – линий электропередач, железных заборов или железной дороги.

Глубина зондирования

В отличие от радиолокации воздушных целей, где среда распространения (воздух) влияет на дальность действия локатора главным образом через расходимость волны, следствием чего является уравнение радиолокации («закон четвертой степени»), в георадиолокации среда вносит свой основной вклад через проводимость σ .

Наличие проводимости приводит к экспоненциальному уменьшению величины поля в процессе распространения волны – к затуханию.

В радиолокации воздушных объектов часто используется понятие энергетического потенциала, который дает представление о возможностях локатора по дальности обнаружения и определяется как

$$\Pi = \frac{P_t}{P_r}, \quad (5)$$

где P_t – мощность передатчика, P_r – чувствительность приемника.

Часто величину энергетического потенциала, определяемую как (5), можно встретить в технических описаниях георадаров, но она практически не отражает возможности прибора по глубине зондирования. Это объясняется множеством технических и радиофизи-

ческих причин, которые не учитываются формулой (5): влиянием передатчика на приемник (наводки), «звоном» антенн, изменением эффективности излучения и приема на разных почвах и т.д.

Пусть, например, динамический диапазон стробоскопического преобразователя 20 дБ и он реализуется при 100 ваттном передатчике. Дальнейшее повышение мощности передатчика в большинстве схем стробоскопического преобразователя приемника не приводит к увеличению глубины, поскольку вместе с сигналом будет расти и внутренняя помеха от наводок. Применение формулы (5) может дать любую цифру, тем не менее, реально, потенциал не будет превышать 20 дБ.

По нашему мнению, наиболее объективным параметром георадара, определяющим глубину зондирования, является экспериментально измеренный реальный энергетический потенциал Π_R , величина которого численно равна максимальному затуханию в среде, при которой радар может обнаружить объект.

Для измерения этой величины можно использовать следующую методику.

На водоеме снимается профиль дна до глубины, на которой отраженный сигнал полностью затухнет и перестанет фиксироваться. Далее по записанному профилю определяется погонное затухание как

$$W = 20 \lg(A_i / A_{i+1}) / 2\Delta h \quad (6)$$

где A_i - измерение амплитуды отраженного от дна сигнала в точке под номером i , Δh расстояние по глубине между точками измерения амплитуды.

Реальный потенциал рассчитывается по формуле:

$$\Pi_R = 2 WH_M \quad (7)$$

Здесь H_M - глубина, на которой исчезает отраженный от дна сигнал.

При выборе водоема в качестве полигона необходимо учесть несколько условий.

1. Понижение дна должно быть плавным, чтобы не уводить отра-

женную волну в сторону. Оценивается по радарограмме.

2. Затухание в воде должно быть однородным по глубине. Оценивается по вычислению погонного затухания (β) для разных глубин.

3. Водоем должен быть достаточно глубоким, чтобы отраженный сигнал перестал фиксироваться в конечной точке профиля.

Эта методика дает несколько заниженное значение реального потенциала, поскольку от дна отражается не вся энергия, зато не требует оборудования специальных полигонов.

Реальный потенциал, выраженный в децибелах, прямо пропорционален максимальной глубине зондирования.

Например, радар с реальным потенциалом 120 дБ способен обеспечить глубину обнаружения в 6 раз большую, чем радар с потенциалом 20 дБ.

Существуют многочисленные табличные данные по погонному затуханию для многих пород в зависимости от частоты.

Максимальную глубину зондирования можно оценить следующим образом.

1. По таблицам, в соответствии с центральной частотой антенны, определить погонное затухание W для данной почвы.

2. Определить максимальную глубину по формуле

$$H_M = \frac{\Pi_R}{2W} \quad (8)$$

Разрешение по вертикали

Разрешение (точность определения) по вертикали Δh границы раздела двух плоскостойких сред составляет половину дальности (глубины), пройденного сигналом за единицу отсчета времени

$$\Delta h = \frac{c\Delta t}{4\sqrt{\varepsilon_1}} \quad (9)$$

где: Δt - шаг по времени, фиксируемый георадаром, ε_1 - диэлектрическая проницаемость первой среды,

Вне зависимости от длительности зондирующего импульса τ , точность определения глубины залегания одиночной границы определяется только дискретностью Δt фиксации отраженного сигнала.

Такая ситуация объясняется тем, что максимум функции, вне зависимости от «плавности» зондирующего импульса, определяемой ее длительностью, при большом соотношении сигнал/шум, всегда фиксируется в одной и той же точке временной оси.

Разрешение по вертикали Δd двух близких границ, расположенных друг за другом, в отличие от предыдущего случая, определяется длительностью зондирующего импульса.

$$\Delta d = \frac{\tau c}{4\sqrt{\varepsilon_2}} \quad (10)$$

где ε_2 - диэлектрическая проницаемость слоя между границами.

Разрешение по горизонтали

Разрешение по горизонтали Δx одиночного объекта (кабель, тонкая труба), при перпендикулярном пересечении - это точность локализации проекции его залегания на поверхность. Пусть объект находится в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ε_1 на глубине h , D - расстояние между приемной и передающей антенной.

В соответствии с рис. 21, время прохождения отраженным сигналом расстояния от передатчика до приемника определяется как

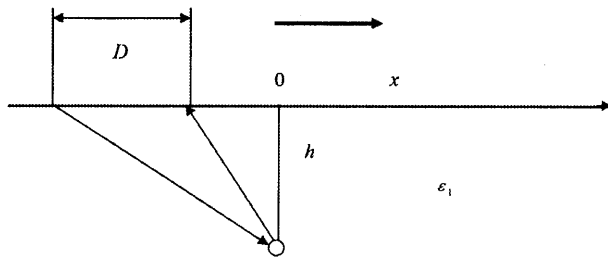


Рис. 21.

$$t = \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{c} \left(\sqrt{\left(x + \frac{D}{2}\right)^2 + h^2} + \sqrt{\left(x - \frac{D}{2}\right)^2 + h^2} \right) \quad (11)$$

Рассмотрим случай малых глубин $h < D$. Из (11) следует, что при $h \rightarrow 0$ соотношение между соседними отсчетами дальности Δx и соседними отсчетами времени Δt имеет вид:

$$\Delta t = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{c} \Delta x \quad (12)$$

Отсюда следует формула для точности определения положения Δx одиночного объекта по горизонтали на малых глубинах

$$\Delta x = \frac{c\Delta t}{4\sqrt{\varepsilon_1}} \quad (13)$$

Формула (13) совпадает с формулой (9), следовательно, точность определения продольной координаты на малых глубинах стремится к точности определения вертикальной координаты. Точность определения Δr двух близких объектов по горизонтальной координате на малых глубинах, как и в формуле (10), определяется длительность зондирующего импульса τ

$$\Delta r = \frac{c\tau}{4\sqrt{\varepsilon_1}} \quad (14)$$

На больших глубинах $h > D$ формула (11) приобретает вид

$$t = 2 \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{c} \sqrt{x^2 + h^2} \quad (15)$$

В (15) дискретность времени и расстояния в вершине гиперболы связаны соотношением

$$\Delta t = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{c} \left(\sqrt{(\Delta x)^2 + h^2} - h \right) \quad (16)$$

Раскладывая подкоренное выражение в ряд, имеем

$$\Delta t = \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{ch} (\Delta x)^2 \quad (17)$$

Отсюда получим формулу для точности определения по горизонтальной координате одиночного объекта по горизонтальной для глубокого одиночного объекта.

$$\Delta x = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta t c h}{\sqrt{\varepsilon_1}}} \quad (18)$$

Точность разрешения по горизонтали двух близких объектов на большой глубине определяется формулой

$$\Delta r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau c h}{\sqrt{\varepsilon_1}}} \quad (19)$$

Приведем конкретные численные значения вертикального и горизонтального разрешения для георадара с параметрами: $\Delta t = 1$ нс; $\tau = 3$ нс. для среды с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1 = 9$.

Разрешение по вертикали одиночной границы (6): $\Delta h = 2.5$ см

Разрешение по вертикали двух близких границ (7): $\Delta d = 7.5$ см

Разрешение по горизонтали одиночного объекта на малой глубине $\Delta x = 2.5$ см

Разрешение по горизонтали двух близких объектов на малой глубине $\Delta r = 7.5$ см

Разрешение по горизонтали одиночного объекта на глубине 2 м. (12) $\Delta x = 20$ см

Разрешение по горизонтали двух близких объектов на глубине 2 м. $\Delta r = 35$ см.

Мы рассмотрели точность обнаружения объектов с использованием методики выбора одной точки профиля, для которой его радиоизображение имеет минимальную задержку. Этот, наиболее простой метод обнаружения, обладает самой низкой точностью среди других методов. Если использовать не одну точку, а, например, весь радиообраз объекта на профиле, точность его определения по временной и пространственным координатам может быть значительно выше полученных нами. Таким образом, формулы (9), (10), (13), (14), (18), (19) дают нижнюю границу оценки точности измерений координат подповерхностных объектов с помощью георадара.

Обратная задача геолокации

Первичная информация, получаемая с георадара — это запись волновой формы пришедших от подземных объектов радиосигналов в зависимости от времени совместно с диффузионными компонентами, если они существуют.

В ряде случаев эта запись волновой формы и является конечной информацией, достаточной для решения поставленной задачи.

Но существует целый ряд других случаев, когда потребителя интересуют не отраженные сигналы, которые несут информацию о подземных объектах в своей специфической форме, а именно геологическое сечение. Возникает обратная задача георадиолокационного зондирования: восстановление структуры подземной среды по радиолокационным отражениям.

В общем случае обратные задачи математической физики плохо обусловлены и неоднозначны, и для их решения необходимо наложить определенные ограничения на свойства среды.

Существует общий способ решения обратных задач — через решения прямых задач, которые, чаще всего, существуют, хорошо обусловлены и однозначны. Для геолокации прямая задача — это расчет принимаемых сигналов для заданной структуры среды. Пример таких расчетов Вы видите на рис. 12-19.

Обратная задача решается итерационным путем: задается произвольный начальный профиль диэлектрической проницаемости и проводимости среды, для которого рассчитываются отраженные сигналы и сравниваются с экспериментально зафиксированным, являющимся эталоном. Для этой цели определяется степень несоответствия полученного решения с эталоном (невязка), и выбирается стратегия подгонки свойств среды так, чтобы при очередном решении прямой задачи невязка уменьшалась. Решение задачи заканчивается тогда (очень часто через многие тысячи циклов), когда невязка станет меньше заданного уровня, а ответом будет последняя коррекция профиля.

То, что необходимо научиться решать обратную задачу, стало очевидным в самом начале нашей работы с георадаром. Для этой цели мы стали привлекать математиков, которые и изложили суть описанного выше способа. Шло время, одних математиков мы меняли на других, но никто из них не смог сделать программу расчета, работающую по реальным сигналам.

Возник вопрос, а почему? Лучший способ понять — это попробовать самому. Запрограммировал численную схему решения одномерного волнового уравнения (4). Для глубины 10 метров программа рассчитывает отраженные сигналы за несколько минут. Но если перейти к двумерной задаче, хотя бы и по очень короткому профилю, речь пойдет о многих часах численного счета.

Трехмерные прямые задачи, близкие к реальной среде, численными методами практически не решаемы. А если предположить, что потребуется 1000 итераций, то становится совершенно очевидным, что подобный подход к решению обратной задачи представляет собой только теоретический интерес.

Тогда и возникла идея алгоритма «Силуэт» для решения обратной задачи георадиолокационного зондирования. Это инженерный, радиотехнический подход, который практикуется на всех наземных, морских и воздушных радиолокаторах: обнаружение сигнала от цели по ряду признаков и его дальнейшее сопровождение. Такой подход возможен, когда отраженные сигналы разделены во времени и могут быть хорошо идентифицированы, как, например, в плоскостных средах, чаще всего встречающихся в геолокации.

Принятый сигнал — это суперпозиция отраженного от разных границ и прошедшего в разное время зондирующего импульса, в проводящих средах дополненного диффузионными «хвостами». Если граница слоя резкая, то форма отраженного сигнала точно повторяет форму излученного импульса, с уменьшенной в результате неполного отражения и затухания амплитудой, а также с обратной полярностью, если граница — это переход в среду с большей диэлектрической проницаемостью.

Если переход от слоя к слою плавный, то отраженный сигнал расширяется, при этом сохраняется основной его признак — наличие двух экстремумов — максимума и минимума, если речь идет о нашей аппаратуре. Могут возникнуть и другие экстремумы, если демпфирование антенн по какой-то причине станет недостаточным и возникнет осциллирующий зондирующий импульс.

Все сигналы георадара имеют общую черту — наличие максимума и минимума, которую мы и будем использовать в обработке по алгоритму «Силуэт».

На волновой функции отметим локальные минимумы и максимумы, и, на первом этапе, только с ними будем работать. Сам вид волновой функции нам малоинтересен, поскольку он несет мало информации о среде, а описывает, в основном, амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики прибора и антенн.

На профиле, представляющем теперь только совокупность точек экстремумов в координатах расстояние — время, «завяжем траектории» - объединим на всем профиле отражения от одних и тех же объектов, т.е. будем «сопровождать» все без исключения цели. Для локализованных объектов — это конечные гиперболы, для протяженных геологических слоев — линии, возможно, существующие на всем профиле от начала до конца.

Для «завязки траекторий» будем использовать алгоритм, который обычно применяется в радиолокаторах для сопровождения самолетов или ракет. На первой точке профиля анализируем первый по задержке экстремум, не является ли он траекторией. Для этого выставим «строб» для второй точки профиля: т.е. некоторый временной интервал, определяемый как:

$$\Delta T = T_1 \pm \frac{t}{2}$$

Здесь ΔT - интервал анализируемых задержек, T_1 - задержка экстремума на первой точке профиля, t - длительность строба.

Если в интервал ΔT на второй точке профиля попадет экстремум того же знака, что и на первой, то они считаются уже траекторией и происходит ее анализ на продолжение в третьей точке профиля, для которой временной интервал анализа определяется как:

$$\Delta T = T_2 \pm \frac{t}{2},$$

где T_2 - задержка сигнала траектории на второй точке профиля.

Траектория заканчивается, когда в стробе для очередной точки профиля экстремум не будет обнаружен. Каждая обнаруженная траектория заносится в память и исключается из общего профиля.

После завязки траектории для первого по задержке экстремума в первой точке профиля происходит та же процедура для второго экстремума и т. д.

Если экстремум не завязался в траекторию, то он считается помехой и тоже исключается из профиля. Все зафиксированные экстремумы должны быть завязаны в траектории или отнесены к помехам.

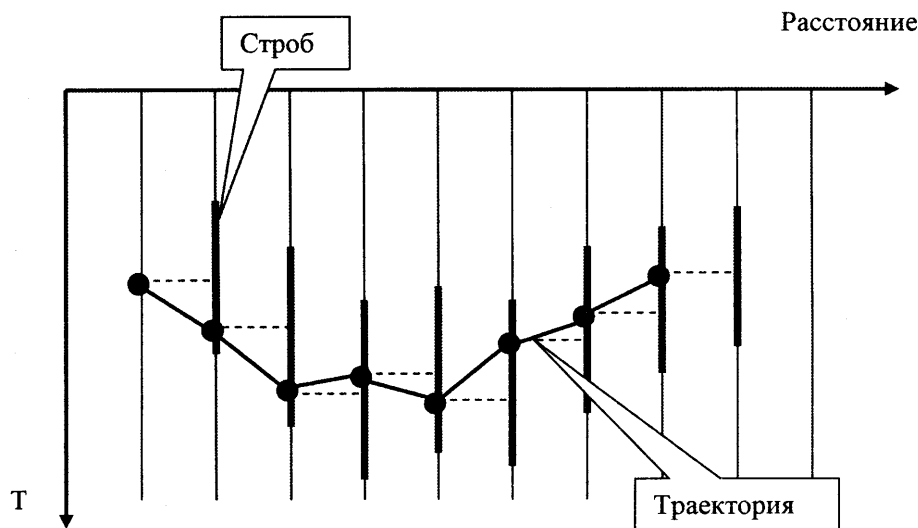


Рис. 22. Завязка экстремумов в траекторию.

Траектория — это функция задержки минимума или максимума сигнала от расстояния по профилю. Каждой геологической границе, вообще говоря, должны соответствовать две траектории, поскольку сигнал имеет как минимум, так и максимум, расположенные один за другим через задержку меньшую, чем длина зондирующего импульса. Такие пары траекторий обнаруживаются, и знак первой из них (с меньшей задержкой) соответствует знаку (фазе) отраженного сигнала и определяется как геологическая граница, а вторая, следующая за первой, идентифицируется как вторая часть сигнала с противоположным знаком и исключается из рассмотрения.

Довольно часто парных траекторий мы не наблюдаем, поскольку вторая часть сигнала по амплитуде меньше первой, и нам не всегда удается зафиксировать этот экстремум. В таком случае мы считаем, что знак сигнала соответствует знаку этой непарной траектории.

Пример результатов, обработанных по описанному алгоритму, показан на рис. 24, исходная запись волновой формы приведена на рис. 23. Этот профиль получен на реке Угре, на полигоне МГУ. Здесь, начиная с трех метров, залегает мощный слой трещиноватого известняка.

В трещиноватых средах, кроме внешних границ, происходит отражение радиосигнала от всей толщи слоя. Причина этого – дифракция (рассеяние) Брэгга на периодических структурах.

Брэгговская дифракция — явление сильного рассеяния волн на периодической решётке рассеивателей при определенных углах падения и длинах волн. Падающая волна последовательно отражается от каждого слоя периодической структуры; все отражённые лучи когерентны и идут в одном направлении, что позволяет им интерферировать. Если все отражённые волны синфазны, то возникает отражённый луч.

(Из Википедии)

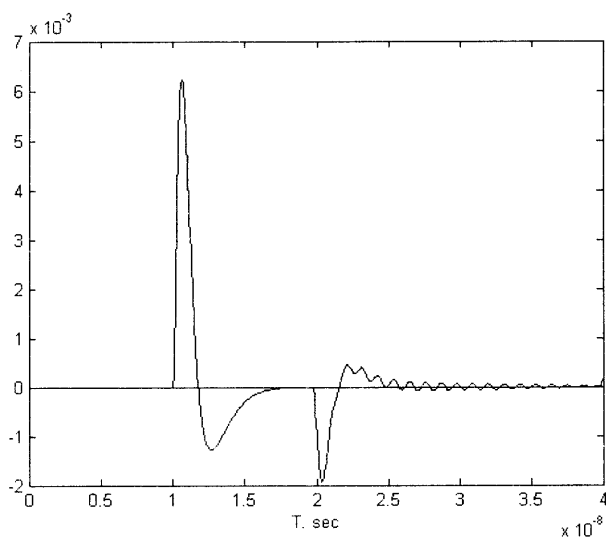


Рис. 25. $\epsilon_1 = 9$ $\epsilon_2 = 30 + 3 \cdot \sin(2\pi x / 0.3)$

На рис. 25 приведен численный пример, показывающий появление рассеяния Брэгга на периодической структуре слоя. Неоднородность моделировалась 10% отклонением диэлектрической проницаемости в зависимости от глубины по гармоническому закону.

Запись реального сигнала от трещиноватой среды показана на рис. 26.

Трещины имеют некоторую среднюю периодичность, и каждая переизлучает слабый сигнал назад, которые, складываясь синфазно, дают регистрируемый отраженный сигнал. Излученный сигнал при отражении приобретет высокочастотную модуляцию, определяемую средним периодом трещиноватости. Этот период меньше, чем длительность зондирующего импульса. Если среда имеет достаточно большую толщину, то отраженные сигналы накладываются друг на друга, образуя непрерывную «дорожку», почти монохроматического типа.

Следует учитывать, что зафиксированные сигналы представляют собой отражение от некоторой усредненной эффективной отражающей поверхности (ЭОП), формируемой большим числом трещин и являются статистической характеристикой трещиноватости среды, которые можно измерять, используя спектральный анализ.

Показанные на рис. 24 линии — это границы геологических структур. Красные обозначают границу перехода в более плотную среду, синие — в менее плотную. Структура трещин имеет и тот и другой характер. Вероятно, часть трещин заполнена воздухом, а часть — водой, но это могут быть и трещины, заполненные водой, но в разных объемных соотношениях с известняком. Здесь наблюдается повышенная проводимость, о чем говорят «хвосты», которые видны на волновых формах рис. 23.

Результаты обработки на рис. 24 получены алгоритмом «Силуэт» автоматически, без какого-либо участия оператора-обработчика. Можно видеть, что «хвосты» не мешают обнаружению радиосигналов, отраженных от трещин.

Такое представление результатов, в отличие от исходных данных, уже понятно любому геологу.

На рис. 24 использовано бинарное (красно-синее) представление экстремумов, когда отображается только факт регистрации локального минимума или максимума волновой функции.

Для георадара Лоза амплитуда экстремумов может отличаться в 1 млн. раз (120 дБ), что отобразить на цветной тоновой картинке представляется сложным и ненужным. Дело в том, что граница между одинаковыми слоями, но расположенными на разной глубине, дает разную амплитуду сигнала. Причина этого — дополнительное затухание в вышележающих слоях.

Естественно, что сами значения амплитуд должны использоваться в дальнейшей математической обработке, так же как и длительность отраженного импульса по расстоянию между парными траекториями, если их удалось зафиксировать.

Конечная цель обработки — перейти от границ во временной области к геологическим слоям в пространственной области. Здесь, в общем случае, используя только профиль среды, без привлечения дополнительной информации решить задачу невозможно: зарегистрированные задержки — это глубина слоя, умноженная на скорость радиоволны в среде; ни то, ни другое, как правило, не известны. Чтобы исключить эту неоднозначность, необходимо привлечение дополнительной информации, которая может быть получена либо зондированием (построением годографа) в некоторых точках профиля, либо измерения «косами», когда в каждой точке профиля снимается годограф, либо профилирование с помощью «непрерывного годографа», когда один и тот же профиль снимается для разных расстояний между передающей и приемной антеннами.