

*С. В. Ялунин, Ф. С. Бессараб,
И. В. Карпов, А. В. Радиевский*

О ПРЯМОЙ ЗАДАЧЕ РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ГЕОРАДАРА

Обсуждается постановка прямой задачи рассеяния для георадара. В качестве теста рассмотрены георадарные сигналы для некоторых подземных объектов.

The article analyses scattering problem for a ground penetrating radar and presents a test on the basis of ground penetrating radar system signals for several underground objects.

Ключевые слова: георадар, прямая задача рассеяния.

Keywords: ground penetrating radar, scattering problem.

В настоящее время методы построения структуры объектов по рентгеновским лучам, сейсмическим и электромагнитным волнам нашли широкое применение в медицине [1; 2] и геофизике [3; 4], а также в космических исследованиях, в которых на данный момент радиозондирование является практически единственным доступным средством определения внутренней структуры космических тел. Большие успехи рентгеновской лучевой томографии в медицине связаны с адекватностью лучевого приближения, а также с возможностью сканировать человеческое тело с разных сторон. В электромагнитной томографии земной поверхности ситуация сложнее. Во-первых, зондирование возможно только с одной стороны земной поверхности. Во-вторых, глубина проникновения электромагнитных волн определяется главным образом поглощением грунта и центральной частотой спектра зондирующего импульса. На практике для получения высокого разрешения по глубине приходится использовать сверхширокополосные и сверхкороткие импульсы – “simple pulse”. Разработка аппаратуры, использующей такие импульсы, требует учета множества противоречивых факторов, связанных с повышением потенциальных возможностей георадара [5]. Цель данной работы – постановка и решение задачи рассеяния для модельного изучения потенциальных возможностей георадаров.

Типичный георадар серии «Лоза» [6] состоит из приемной и передающей дипольных антенн, расположенных параллельно на фиксированном расстоянии друг от друга. В некоторый момент времени, передающая антенна излучает электромагнитный импульс. При распространении в среде электромагнитный импульс частично отражается от неоднородностей, в которых наблюдается пространственное изменение диэлектрической проницаемости или проводимости. Приемная антенна фиксирует отраженный сигнал как функцию времени приема и положения георадара. Результатом подповерхностного зондирования является двумерное распределение интенсивности сигнала. Например, на рисунке 1 представлено изображение, полученное георадаром «Ло-

за-В» при археологическом исследовании на склоне южнее гробницы Хафраанха в 2006 г. в ходе российской археологической миссии, организованной институтом востоковедения РАН [6]. На этом рисунке отчетливо проявляются характерные гиперболические структуры, возникающие при отражении сигнала от локализованного подземного объекта. К сожалению, изображения, полученные с помощью георадара, не всегда допускают ясную интерпретацию. Оператор может лишь с большей или меньшей долей уверенности строить предположения о наличии подземных объектов и их форме. В рассмотренном примере, при дальнейших раскопках было установлено, что полученное изображение соответствует гробнице (рис. 2), состоящей из двух «комнат».

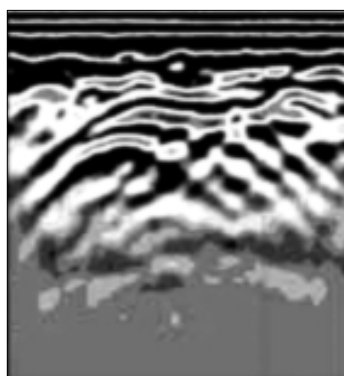


Рис. 1



Рис. 2

Один из возможных путей преодоления проблемы интерпретации заключается в постановке и решении прямой задачи рассеяния для георадара, а также исследовании изображений для различных подземных объектов. Прямую задачу рассеяния можно формулировать как в импульсно-частотном (см., например, [7]), так и в координатно-временном представлении. Поскольку приемный сигнал в нашем георадаре является функцией положения и времени приема, будем далее придерживаться координатно-временного представления. Из уравнений Максвелла, используя понятие вектора Герца [8, с. 282], мы получили следующее интегрально-дифференциальное уравнение для электрического поля в среде:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0(\vec{r}, t) + (4\pi)^{-1} \int \psi(\vec{r}) \left(\text{grad div} - u^{-2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \frac{E(\vec{r}', t')}{|\vec{r}' - \vec{r}|} dV', \quad (1)$$

где $\vec{E}_0(\vec{r}, t)$ – электрическое поле передающей антенны, $\vec{E}(\vec{r}, t)$ – результирующее поле с учетом рассеяния, $t' = t - |\vec{r} - \vec{r}'|/u$ – момент времени с учетом времени задержки сигнала, $\psi(\vec{r}) = (\varepsilon(\vec{r}) - \bar{\varepsilon})/\bar{\varepsilon}$ и $\bar{\varepsilon}$ – средняя диэлектрическая проницаемость грунта. Используя первое приближение Борна, а также некоторые другие упрощающие предположения, нам удалось свести задачу рассеяния к интегральному уравнению Фредгольма I рода с частично разностным ядром, которое свя-

зывает относительную диэлектрическую проницаемость грунта с сигналом $U(x,t)$ в приемной антенне:

$$U(x,t) = \int_{-\infty}^{\infty} dx' \int dy' L(x-x', y', t) \psi(x, y), \quad (2)$$

$$L(x, y, t) = \frac{K(t - (2/u)\sqrt{x^2 + y^2})}{x^2 + y^2}, \quad (3)$$

где $L(\cdot)$ – ядро интегрального оператора; $h=uT/2$ – наибольшая глубина, доступная для зондирования за время T , в течение которого ведется прием сигнала, а u – средняя скорость электромагнитных волн в среде в нулевом приближении Борна. Ядро интегрального оператора содержит аппаратную функцию $K(t)$, которая определяется формой импульса тока в передающей и чувствительностью приемной антенн. Если длительность импульса обозначить через τ , то функция $K(t)$ должна обращаться в ноль при $t < 0$ и при $t > \tau$. В дальнейшем будем подразумевать под прямой задачей рассеяния проблему определения приемного сигнала $U(x,t)$ для заданного распределения диэлектрической проницаемости, т.е. функции $\psi(x,y)$.

В качестве теста рассмотрим примеры восстановления георадарного сигнала для отражающих объектов с известной формой. Для этого нами была разработана и реализована в виде программы на C++ модель распространения сигнала. Предполагалось, что грунт является диэлектриком со средней относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon=2$, для которого скорость электромагнитных волн $u=15$ см/нс. При проведении расчетов предполагалось, что расстояние между приемной и передающей антеннами равно 1 м, а разрешение приемного сигнала по времени примерно совпадает с длительностью самого импульса и составляет 1 нс, что характерно для георадара «Лоза-В». Ниже приведены результаты расчетов для подземных объектов с глубиной залегания около 9 м. На рисунке 3, а и 3, б изображен сигнал от объектов круглой и квадратной формы с характерным размером 2 м. Отметим гиперболическую форму получаемых изображений от тестовых объектов. Можно заметить также, что для квадратного объекта, изображение результирующего сигнала имеет более «угловатую» форму. В соответствии с принятой разрешающей способностью эта тенденция должна сохраняться вплоть до объектов с размером порядка 10 см. На рисунке 3, с и 3, д изображены сигналы для протяженных объектов длиной 4 м. Заметим, что форма результирующего сигнала зависит также от положения предмета в грунте. Если объект расположен в грунте под некоторым углом к горизонту, то максимальная интенсивность отраженного сигнала смещается в сторону от реального расположения объекта. В рассмотренном примере, когда угол наклона равен 45° , это смещение составляет 2 м. Мы объясняем этот эффект отражением от наклонной поверхности подземного объекта. В заключение заметим, что в реальной среде присутствует затухание, приводящее к ослаблению сигнала и ограничению на глубину зондирования. Глубину зондирования можно увеличить, если использовать более длинные волны, для которых, как известно, затухание меньше, но при этом следует ожидать ухудшения разрешения по глубине.

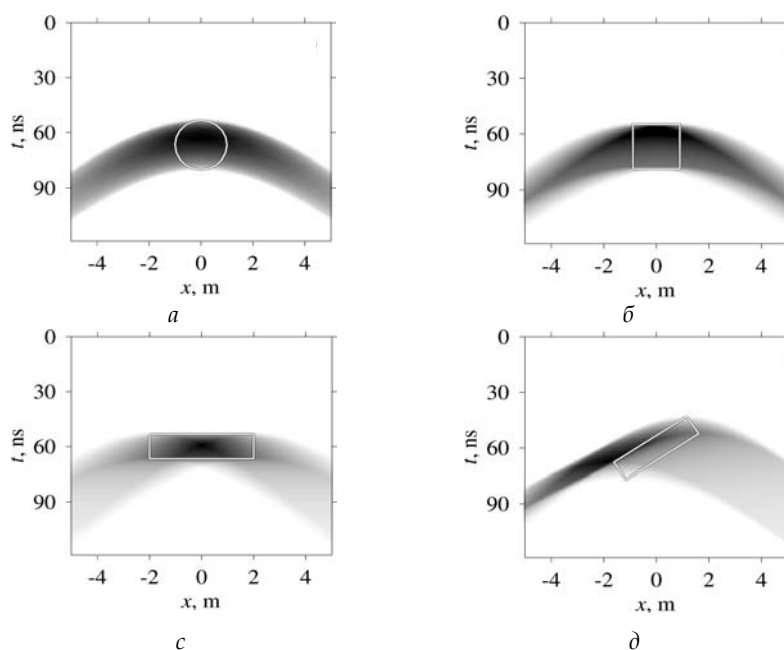


Рис. 3

Список литературы

1. *Preim B., Bartz D.* Visualization in Medicine: Theory, Algorithms and Applications. Elsevier, 2007.
2. *Левин Г. Г., Вишняков Г. Н.* Оптическая томография. М., 1989.
3. *Г. Нолет, К. Чепмен и др.* Сейсмическая томография. М., 1990.
4. *Knight R.* Ground penetrating radar for environmental applications, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 29 2001. P. 229–255.
5. *Резников А.Е., Копейкин В.В. и др.* Разработка аппаратуры, методов обработки данных для электромагнитного подповерхностного зондирования и опыт их применения // УФН. 2000. 170. С. 565–568.
6. <http://geo-radar.ru>
7. *Polat B., Meincke P.* A forward model for ground penetrating radar imaging of buried perfect electric conductors within the physical optics approximation, *Int. J. Electron. Commun.* 2004. 58. P. 362–366.
8. *Jackson J. D.,* Classical Electrodynamics, 3rd ed. Wiley, 1999.

Об авторах

И. В. Карпов — д-р физ.-мат. наук, проф., РГУ им. И. Канта.
 Ф. С. Бессараб — канд. физ.-мат. наук, доц., РГУ им. И. Канта.
 А. В. Радиевский — канд. физ.-мат. наук, доц., РГУ им. И. Канта.
 С. В. Ялунин — канд. физ.-мат. наук, доц., РГУ им. И. Канта.

Authors

Ivan Karpov — Prof., IKSUR.
 Fyodor Bessarab — Dr., IKSUR.
 Alexander Radiyevsky — Dr., IKSUR.
 Sergey Yalunin — Dr., IKSUR.

