

ГЕОРАДАР

Валерий Помозов, Николай Семейкин, Юрий Семейкин,
Андрей Никифоров, Орест Поцепня, Валентин Флоринский

Описаны некоторые результаты разработки и испытаний георадара, предназначенного для зондирования твердых, сыпучих и жидких сред. Приведены материалы, иллюстрирующие применение различных методов математической обработки сигналов георадара.

Введение

Задача отыскания различных предметов (металлических и неметаллических), пустот и других неоднородностей, находящихся под поверхностью земли (воды), очень актуальна при проведении строительных и археологических работ, таможенного досмотра, а также во многих других сферах хозяйственной деятельности.

Решение этих задач возможно с использованием магнитных, акустических, ультразвуковых и других обнаружителей.

Очень эффективно многие из подобных задач могут быть решены без вскрытия среды и проведения раскопочных работ с помощью георадиолокатора (георадара).

В настоящей статье приведены характеристики унифицированного георадара, созданного фирмой «Логические системы» и НИИ Приборостроения (г. Жуковский) в результате завершения цикла ОКР с использованием антенных разработок кафедры распространения радиоволн МФТИ.

Георадар состоит из блока обработ-

ки, блока питания и комплекта сменных антенн:

- а) антенны (приемная и передающая) большой глубины зондирования;
- б) антенны средней глубины зондирования;
- в) антенны высокого разрешения.

Назначение, принцип действия, технические характеристики

Георадары предназначаются для

- обнаружения под землей (под водой) металлических и неметаллических предметов;
- отыскания трубопроводов и продуктопроводов;
- контроля качества покрытия аэродромов и автомобильных дорог, обнаружения промоин под покрытием аэродромов, автодорог и железнодорожного полотна;
- обнаружения протечек в продуктопроводах;
- определения глубины промерзания грунта и уровня грунтовых вод;
- археологических работ и т. п.

Построение прибора основано на

использовании классических принципов радиолокации.

Однако, в отличие от обычного радиолокатора, передающей антенной прибора излучаются импульсы малой длительности (единицы наносекунд), имеющие 2–3 полупериода квазигармонического сигнала и достаточно широкий спектр излучения. Центральная частота сигнала для описываемого георадара составляет 250, 700 или 1300 МГц в зависимости от типа антенн.

Выбор длительности импульса определяется необходимой глубиной зондирования и разрешающей способностью прибора.

Для формирования таких импульсов используется возбуждение широкополосной передающей антенны перепадом напряжения.

Излученный в исследуемую среду импульс отражается от находящихся в ней предметов или неоднородностей среды, имеющих отличную от среды диэлектрическую проницаемость или проводимость (металл, пустоты, другая среда и т. п.), принимается широкопо-

Таблица 1. Основные характеристики георадара

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра		
		Антенны большой глубины зондирования	Антенны средней глубины зондирования	Антенны высокого разрешения
1.	Глубина зондирования, м	5-10	2-4	0,7-1,5
2.	Разрешающая способность, м	0,3	0,1	0,03-0,05
3.	Длительность импульса, нс	5-6	2,0	< 1,0
4.	Средняя частота спектра, МГц	250	700	1300
5.	Амплитуда импульсов на входе передающей антенны, В	400-500	300-500	30
6.	Масса с аккумуляторной батареей, кг	18	11	9
7.	Частота следования импульсов, кГц	20-50		
8.	Объем памяти ДЗУ, Мбайт	2-250		
9.	Напряжение питания, В	12,0		
10.	Потребляемая мощность средняя, Вт	< 12,0		

лосной приемной антенной, усиливается в широкополосном усилителе, при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуется в цифровой вид и запоминается в долговременном запоминающем устройстве (ДЗУ) для последующей обработки. Одновременно информация поступает на обработку в вычислительную систему. После обработки полученная информация отображается на индикаторе.

При необходимости эта информация может быть выведена для дальнейшего анализа на ПЭВМ IBM PC.

Характеристики созданного прибора приведены в таблице 1.

На базе разработанного прибора возможно создание георадара с глубиной зондирования 20-40 метров при оснащении его антеннами со средней частотой спектра сигнала 70-100 МГц.

На рис. 1 приведена фотография общего вида георадара с антеннами средней глубины зондирования, на рис. 2 – с антеннами большой глубины зондирования.

Некоторые результаты испытаний

Полевые испытания проводились на полигоне ТОО «ЛОГИС», на взлетной полосе аэродрома «Внуково», на водо-

еме и на железнодорожной платформе, загруженной гравием.

На полигоне ТОО «ЛОГИС» для проведения испытаний использовался макет железнодорожного полувагона с металлической обшивкой, засыпанный песком, с вложением в него различных металлических (труба, пластины металла) и неметаллических (деревянный ящик) предметов.

рытого на глубине 1 м. На распечатке четко просматривается также металлический пол макета вагона.

При исследовании антеннами средней глубины зондирования железнодорожной платформы с гравием была обнаружена металлическая консервная банка, зарытая на удалении 0,1 м от металлических стенок в углу платформы на глубине 0,6 м.



Рис. 1. Радар среднего разрешения для глубин до 3 м в сборе (приемо-передающий блок, блок обработки, индикатор)

Поиск вложенных предметов осуществлялся попеременно с антеннами большой и средней глубины зондирования путем сканирования антенным блоком по поверхности песка, заполняющего макет вагона.

Все предметы, вложенные в песок, были неоднократно обнаружены, результаты измерений выведены на ПЭВМ IBM PC и распечатаны.

На рис. 3а приведена распечатка результатов зондирования с помощью антенн средней глубины зондирования (без обработки). На распечатке отчетливо видны сигналы, отраженные от наклонного и горизонтально расположенного металлических листов.

На рис. 4 приведена распечатка трехмерного изображения сигнала от деревянного пустого ящика, закрытого на глубине 1 м.

Вычитание помех

Такие помехи, как прямой сигнал, просачивающийся из передающей антенны в приемную, сигнал, отраженный от поверхности земли, шумы приемного тракта, регулярные наводки, возникающие в аппаратуре (например 50 Гц), и некоторые другие могут быть подавлены с помощью следующего алгоритма, приведенного в [1]:

$$g_{pi}(n) = g_i(n) - a_j(n), \quad i=j, \dots, (j + N_a - 1),$$

$$a_j(n) = 1/N_a \sum_{k=j}^{j+N_a-1} g_k(n),$$

где $g_i(n)$ — отчет i -й реализации принятого сигнала;

$a_j(n)$ — средний уровень шума;

N_a — число реализаций.

При изменении параметров j и N_a средний уровень может приобретать различный смысл (глобальное среднее значение по всем реализациям, текущее среднее и т. д.).

Сжатие сигнала по глубине

Для повышения разрешающей способности по глубине используются различные способы сжатия (уменьшения длительности) отраженных сигналов. Такое сжатие может быть достигнуто с помощью фильтра сжатия импульса, правда, за счет потерь в отношении сигнал/шум.

Связь между выходным и входным сигналами такого фильтра описывается интегральным уравнением Фредгольма:

$$w(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot h(t-\tau) \cdot d\tau$$



Рис. 2. Георадар для глубин до 10 м

На рис. 5 приведены результаты локализации покрытого льдом водоема, полученные с помощью антенн большой глубины зондирования.

Дополнительная обработка сигналов георадара

При зондировании среды на вход приемника георадара, кроме полезного сигнала, попадают прямой сигнал, проникающий непосредственно из передающей антенны в приемную, а также сигнал, отраженный от поверхности земли.

Кроме того, из-за широкой диаграммы направленности антенн к сигналам в месте зондирования примешиваются сигналы от других предметов, находя-

щихся на поверхности, что затрудняет выделение сигналов в заданном месте.

Для уменьшения влияния перечисленных факторов, кроме схемотехнических методов селекции полезного сигнала, разработаны алгоритмы и программы обработки сигналов. В настоящее время в георадар внедрены следующие методы обработки:

- вычитание помех;
- сжатие сигнала по глубине (деконволюция);
- синтез апертуры (метод миграции);
- вычитание тренда;
- полосовая фильтрация и т. д.

Некоторые методы обработки более подробно описаны во врезке.

В статье приводятся результаты зондирования в различных средах при использовании математических методов обработки сигналов георадара.

На рис. 6а представлены результаты зондирования георадаром с антенна-

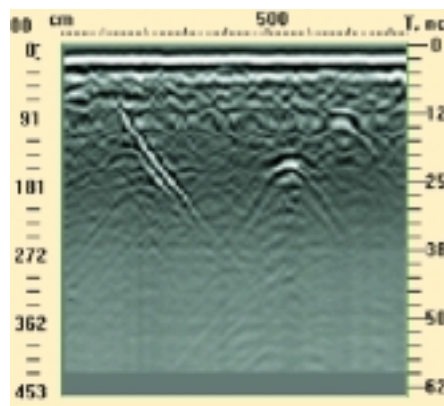


Рис. 3а. Исходные результаты локации

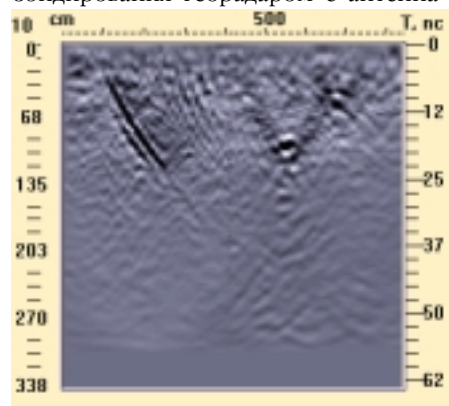


Рис. 3б. После обработки сигналов методом миграций

Сигналы от зарытых на глубине 100-110 см наклонного металлического листа и металлической полоски шириной 40 см. Размер антенны 16x16 и 10x10 см. Шаг перемещения антенн 10 см.

Здесь $w(t)$ — выходной, а $g(t)$ — входной сигналы фильтра сжатия.

Синтез такого фильтра сформирован как вариационная задача поиска максимума функционала

$$I_1 = w(0) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot h_1(-t) \cdot dt = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) \cdot H_1(f) \cdot df$$

при следующих ограничениях:

$$I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} \{h_1(t)\}^2 \cdot dt = \int_{-\infty}^{\infty} |H_1(f)|^2 \cdot df = \text{const}$$

$$I_3 = \int_{-\infty}^{\infty} \{w(t)\}^2 \cdot dt = \int_{-\infty}^{\infty} |W(f)|^2 \cdot df = \text{const}$$

$$I_4 = w(t_i) + w(-t_i) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} G(f) \cdot H_1(f) \cdot \cos(2\pi f t_i) \cdot df = \text{const}$$

Здесь $i = 1, 2, \dots, N$;

$w(0)$ — максимальное значение выходного сигнала $w(t)$;

$G(f)$; $H_1(f)$ и $W(f)$ — преобразование Фурье соответственно $g(t)$; $h_1(t)$ и $w(t)$.

Максимизация функционала I_1 при указанных ограничениях означает минимизацию длительности импульса $w(t)$:

$$H_1(f) = \frac{C(f) \cdot G(f)}{(1-\eta) + \eta |G(f)|^2}$$

Если η стремится к 0 (большой уровень шума), то фильтр сжатия вырождается в согласованный и нет выигрыша в разрешающей способности. При η , стремящемся к единице (уровень шума очень мал), приведенное выражение описывает инверсный фильтр, позволяющий существенно улучшить разрешение по дальности. В общем случае параметр должен быть частотно независимым. Множитель $C(f)$ является весовой функцией, предназначенной для уменьшения боковых лепестков.

Данный алгоритм хорошо работает при больших соотношениях сигнал/шум, что подтверждается экспериментально полученными результатами.

Синтез апертуры (метод миграции)

Учитывая достаточно низкую среднюю частоту излучаемого широкополосного сигнала, невозможно создание антенных устройств малых размеров с достаточно узкой диаграммой направленности. Единственно возможным методом повышения

ми высокого разрешения оштукатуренной кирпичной стены толщиной 0,4 м при наличии предметов за стеной (металлической арматуры) без обработки. На рис. 6б и 3б показаны результаты обработки данных зондирования с помощью методов вычитания и миграции.

Анализ показывает, что в ряде случаев использование дополнительной обработки сигналов существенно повышает разрешающую способность георадара.

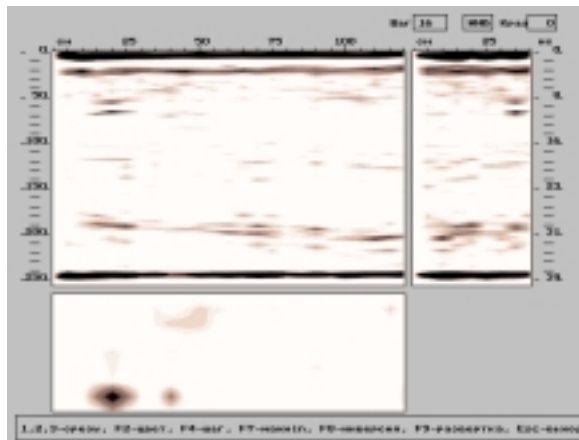


Рис. 4. Трехмерное представление результатов локации. На рисунке хорошо виден пустой деревянный ящик, зарытый на глубине около 1 м

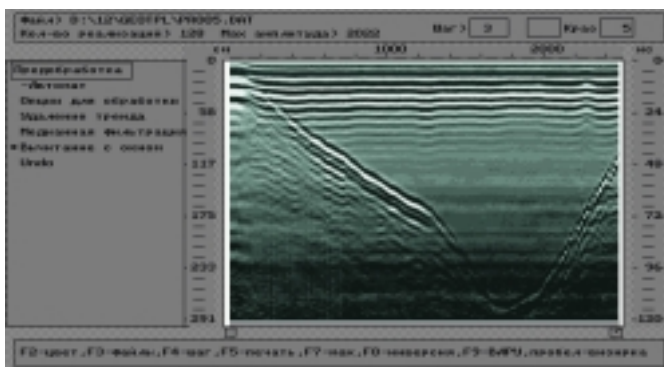


Рис. 5а. Исходные сигналы

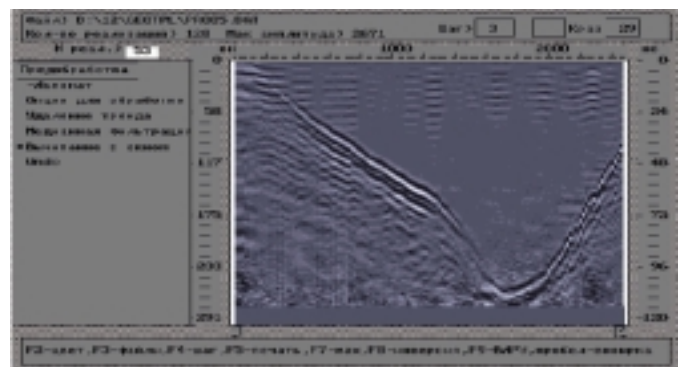


Рис. 5б. Результат обработки методом вычитания помех.

На рис. 7 приведены результаты зондирования покрытия летного поля (аэродром «Внуково») с целью определения однородности грунта (отсутствия промоин и других нарушений) под плитами аэродрома.

Исследование проводилось антеннами большой глубины зондирования. На рисунке ясно различается слоистая структура зондируемой среды, отчетливо видна граница между плитами, так как в районе стыков плит имеется металлическая арматура.

Выводы

1. Испытания показали, что георадар обеспечивает уверенное обнаружение

Размер антенны 40x40 см, шаг перемещения 20 см

разрешающей способности в горизонтальной плоскости может быть метод искусственного синтеза апертуры антенны.

Алгоритм синтеза апертуры описывается выражением:

$$Q(X_i, Z_j) = \sum_{m=-M}^M D_m \cdot P(X_{i+m}, Z_m)$$

Здесь X_i, Z_j — координаты подповерхностной точечной цели (элемента разрешения);

$P(X, Y)$ — отраженный целью сигнал;

D_m — весовые коэффициенты, зависящие от направленных свойств антенны;

$Z_m = \sqrt{(X_{i+m} - X_i)^2 + Z_j^2}$ — длина прямой, соединяющей элемент (x_i, z_j) и антенну,

M — эквивалент количества антенн.

Алгоритм позволяет получить разрешающую способность, эквивалентную физической решетке, состоящей из $(2M+1)$ отдельных антенн. Если передвижная приемная антенна является всенаправленной, то горизонтальное разрешение будет

наилучшим:

$$l = \lambda \cdot Z_j / 2L$$

Здесь λ — длина волны в среде;

L — длина синтезированной апертуры.

Однако в среде диаграмма направленности становится уже, даже если в свободном пространстве она всенаправлена, что снижает эффективность алгоритма.

Синтез апертуры позволяет также улучшить соотношение сигнал/шум. Так, если для цели (x_i, z_i) обозначить как (s/σ_n) соотношение сигнал/шум до обработки, шум считать стационарным и не зависящим от сигнала, то уровень шума после обработки равен $\sqrt{2M+1} \cdot \sigma_n$, а амплитуда сигнала $S = s \sum_{m=-M}^M D_m$.

Тогда выигрыш в соотношении сигнал/шум после синтеза составит:

$$\rho = \frac{\sum_{m=-M}^M D_m}{\sqrt{2M+1}}$$

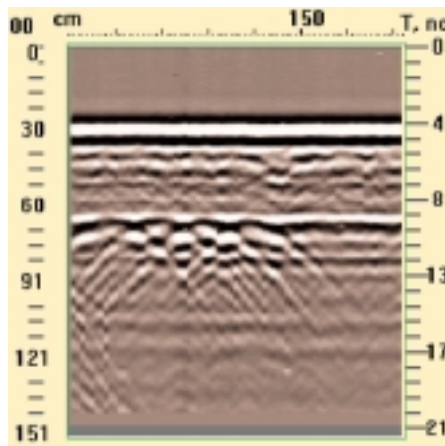


Рис. 6а. Результаты локации стены толщиной 41 см с заложенными за ней металлическими прутьями диаметром 15 мм и шагом 30 см. Размер антенны 4х6 см. Шаг перемещения антенн 3 см

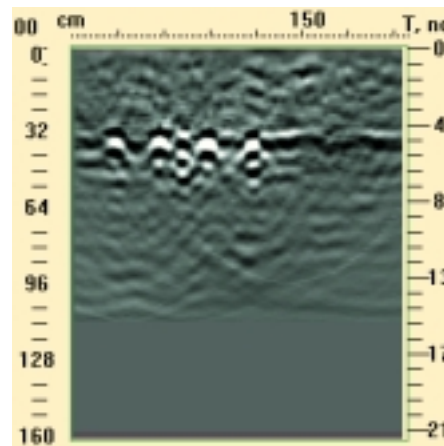


Рис. 6б. Обработка сигнала методами вычитания и миграции улучшает характеристики георадара

предметов под землей и под водой, а также внутри насыпных грузов, находящихся в металлических кузовах автомобилей, железнодорожных вагонах и трюмах кораблей. При этом отражения от металлических стенок не мешают обнаружению даже при небольшом удалении предмета от стенки.

2. Реализованные в созданном георадаре математические методы обработки сигналов георадара во многих случаях существенно повышают разрешающую способность и вероятность правильного обнаружения предметов и неоднородностей.

3. Для улучшения качества зондирования и более детального исследования проверяемых участков местности,

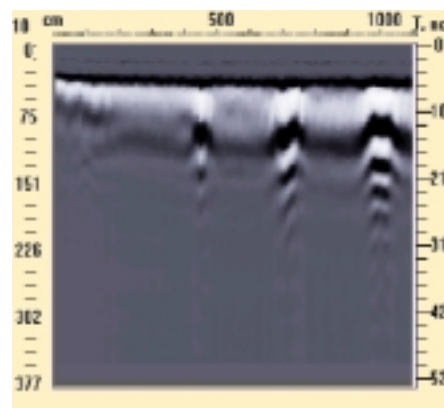


Рис. 7а. Исходные результаты зондирования

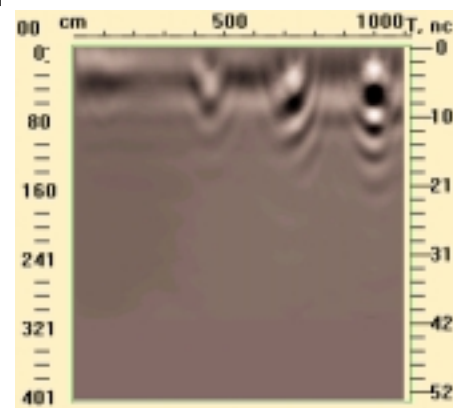


Рис. 7б. Сигналы, обработанные методом миграции

Результаты зондирования взлетно-посадочной полосы аэропорта «Внуково». Размер антенны 40х40 см. Шаг перемещения 25 см

грузов и т. п. целесообразно комплексное использование антенн с различной глубиной зондирования и разрешающей способностью. ●

Литература

1. Хармут Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и связи/ Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1985.