

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-

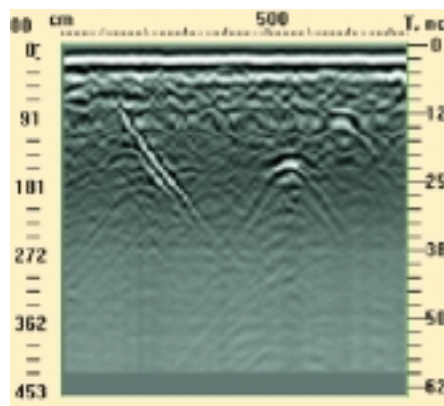


Рис. 3а. Исходные результаты локации

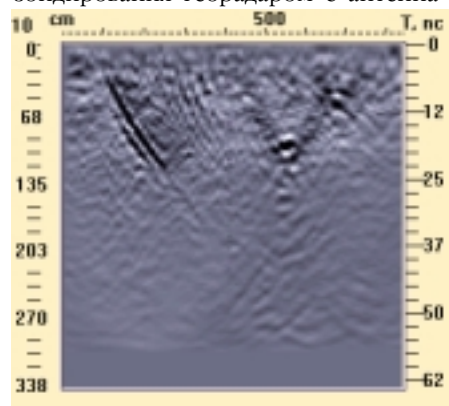


Рис. 3б. После обработки сигналов методом миграций

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.

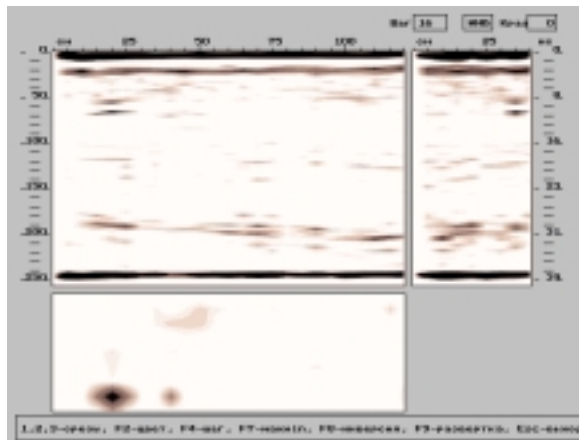


Рис. 4. Трехмерное представление результатов локации. На рисунке хорошо виден пустой деревянный ящик, зарытый на глубине около 1 м

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

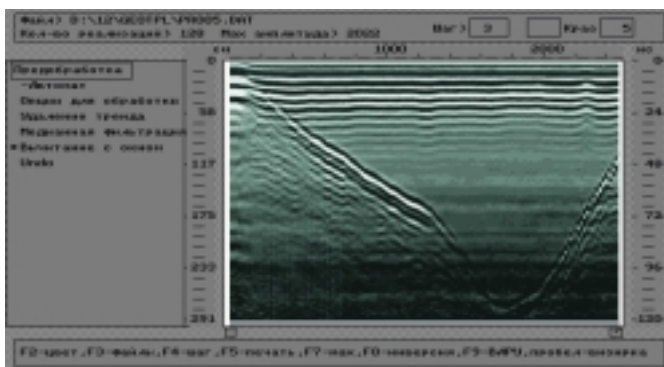


Рис. 5а. Исходные сигналы

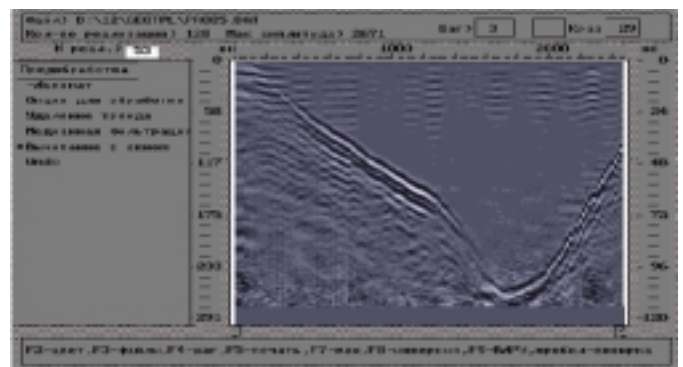


Рис. 5б. Результат обработки методом вычитания помех.

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:

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

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:

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

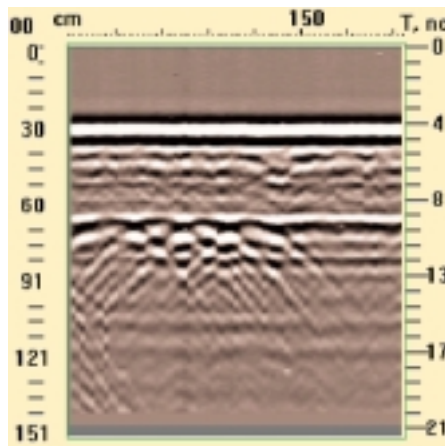


Рис. 6а. Результаты локации стены толщиной 41 см с заложными за ней металлическими прутьями диаметром 15 мм и шагом 30 см. Размер антенны 4х6 см. Шаг перемещения антенн 3 см

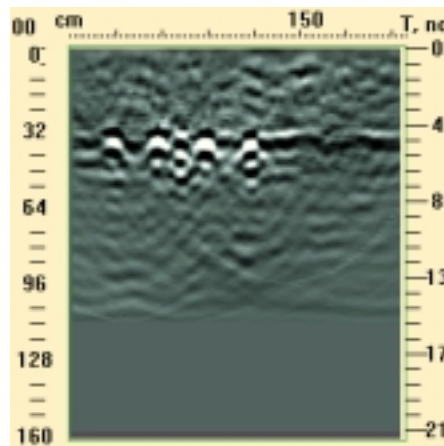


Рис. 6б. Обработка сигнала методами вычитания и миграции улучшает характеристики георадара

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,

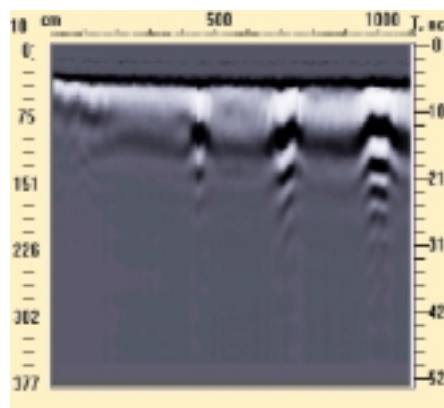


Рис. 7а. Исходные результаты зондирования

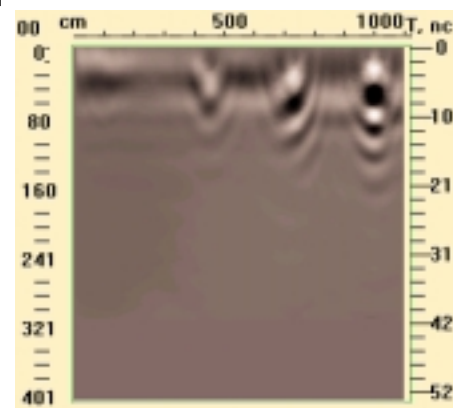


Рис. 7б. Сигналы, обработанные методом миграции

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.