

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.3>

УДК: 621.396.96

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ПЛОТНЫХ СРЕД

К.Ю. Гаврилов¹, И.В. Каменский¹, М.Д. Монахов¹,
А.А. Дубовский¹, Е.В. Руденко¹, Д.К. Балахнина^{1,2}

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, дом 4

² Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина
125190, Россия, Москва, Ленинградский проспект, дом 80, корпус 16

Статья поступила в редакцию 15 апреля 2026 г.

Аннотация. Разработана методика моделирования радиолокационных изображений (РЛИ) при подповерхностном зондировании плотных сред, учитывающая свойства неоднородности среды и наличие помеховых отражений, накладывающихся на полезные сигналы. Приведено описание разработанной методики, которая включает моделирование сигналов трех видов: отражения от объектов, представляющих интерес; отражения от протяженных областей неоднородностей среды; помеховые сигналы, соответствующие отражениям от мелких элементов среды, рассматриваемых как точечные отражатели. При моделировании неоднородностей среды использована модель случайного процесса авторегрессионного вида с последующей низкочастотной фильтрацией и процедурой изменения контраста. Для каждого из трех видов сигналов приведено описание процедуры моделирования и представлены примеры РЛИ при варьировании различных параметров моделей. Получены результаты, позволяющие моделировать близкие к реальным РЛИ подповерхностных объектов различных классов, которые можно использовать для обучения нейросетевых и других алгоритмов обнаружения и распознавания объектов на

изображениях, а также для оценки вероятностных характеристик таких алгоритмов.

Ключевые слова: подповерхностная радиолокация, зондирование плотных сред, двумерное радиолокационное изображение, видеоимпульсный сигнал, случайный процесс типа авторегрессии, фильтрация изображений.

Автор для переписки: Монахов Максим Дмитриевич,
maksimusmaks1998@gmail.com

Введение

При радиолокационном зондировании плотных сред одной из важнейших задач является обнаружение и определение местоположения объектов заданной формы. Особенности и свойства формируемых при этом радиолокационных изображений в значительной степени зависят как от вида среды зондирования, так и от свойств искомых объектов – формы, размеров, материала. Зондируемыми средами могут быть бетон, кирпичная кладка, гипсовые плиты, земной покров и др., а объектами интереса – трубопроводы, электропровода, пустоты, дефекты конструкции, элементы арматуры, крепежа и др.

Обнаружение и распознавание различных объектов на основе результатов радиолокационного зондирования выполняется, как правило, опытными операторами на основе анализа радиолокационных изображений (РЛИ), характеризующих сечения зондируемой среды горизонтальными и вертикальными плоскостями. Автоматизация процедуры обнаружения и распознавания подповерхностных объектов является сложной задачей и решается обычно с помощью различных преобразований РЛИ – метода синтеза апертуры, метода миграции, построения годографов и др. [1-3]. Альтернативой подобным «традиционным» методам являются обучаемые методы распознавания образов, основанные на использовании нейронных сетей глубокого обучения [4, 5]. В последнем случае эффективность обучаемых классификаторов в значительной степени зависит от качества РЛИ,

определяемого достоверностью представления изображений подповерхностных объектов различных классов.

К сожалению, традиционные методы аугментации изображений [5], направленные на расширение базы РЛИ путем введения геометрических искажений, добавления помех и шумов, оказываются малоэффективными для решения подобных задач, т. к. не учитывают специфику РЛИ подповерхностного зондирования различных сред – неоднородность электрических свойств среды, свойства помех, искажения сигналов при изменении ракурса объекта и др. В связи с этим актуальной становится задача моделирования двумерных РЛИ различных объектов с учетом изменения статистических характеристик как параметров среды, так и объектов интереса.

Целью данной работы является разработка методики статистического моделирования РЛИ различных объектов с учетом свойств среды зондирования, помех и искажений сигналов, отраженных от подповерхностных объектов.

Результаты работы предполагается использовать для формирования базы данных РЛИ различных объектов и сред зондирования, которая может послужить основой при создании множества изображений в задачах обучения и тестирования алгоритмов обнаружения и распознавания объектов с помощью нейронных сетей или других классификаторов.

1. Двумерные изображения объектов в подповерхностной радиолокации

При подповерхностном зондировании плотных сред радар-сканер перемещается по поверхности границы среды в плоскости xOy , см. рис. 1 *а,б*. Зондирование осуществляется в точках двумерной сетки (x_k, y_l) , $k = 1, \dots, K, l = 1, \dots, L$, каждая из которых является центром антенной системы, состоящей из пары передающей A_T и приемной A_R антенн, см. рис. 1*в*. Интервал зондирования между соседними точками, согласно рис. 1*б*, равен Δx и Δy по осям Ox и Oy соответственно.

Амплитуды сигналов, отраженных от подповерхностных объектов, в значительной степени зависят от формы объекта и вида его материала. В случае объектов, состоящих из электропроводящих материалов, отражение происходит лишь от верхней поверхности (или поверхности, «видимой» из точки зондирования), для объектов из диэлектрика возможно отражение также и от внутренней части объекта. В общем случае расчет параметров отраженных сигналов сводится к расчету диаграммы обратного рассеяния объекта (цели), который может выполняться различными методами: методы электродинамики, методы геометрической оптики, методы на основе теории геометрической дифракции и др.

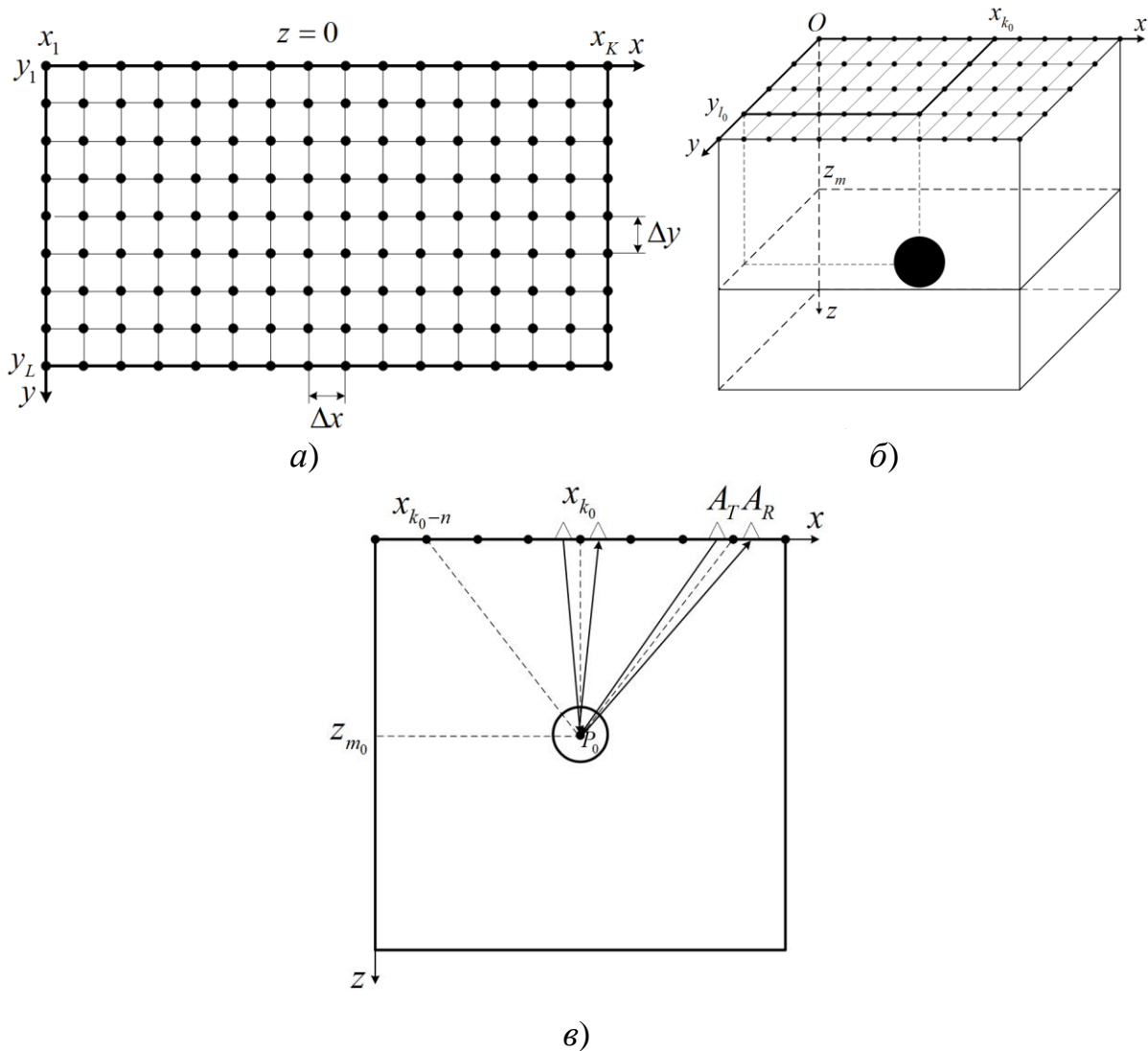


Рис. 1. Схематическое изображение области зондирования, содержащей объект типа «сфера»: а) точки расположения радара-сканера на поверхности; б) объемное представление среды зондирования; в) сечение среды вертикальной плоскостью.

На рис. 1а, в приведен пример расположения подповерхностного объекта, имеющего форму сферы с центром в точке $P = (x_{k_0}, y_{l_0}, z_{m_0})$ и радиусом r . Таким образом, значение $(z_{m_0} - r)$ определяет глубину расположения объекта в среде. Используя метод геометрической оптики в рассматриваемом случае [6], нетрудно получить картину отраженных сигналов в виде сечения трехмерного куба данных цифровых отсчетов, представленных в виде матрицы комплексных отсчетов $\mathbf{S} = \{s(k, l, m), k = 1, \dots, K, l = 1, \dots, L, m = 1, \dots, M\}$. Здесь значения $s(k_0, l_0, m)$ при $m = m_1, \dots, m_2$ соответствуют дискретным комплексным отсчетам функции отклика точечной цели, расположенной на глубине (дальности) по оси Oz при $z_{m_0} = \Delta z(m_0 - 1)$, $m_1 \leq m_0 \leq m_2$, в точке зондирования с координатами $[x_{k_0} = \Delta x(k_0 - 1), y_{l_0} = \Delta y(l_0 - 1)]$.

Вид сигнала, принимаемого от точечного отражателя, зависит от вида зондирующего сигнала, в качестве которого в подповерхностной радиолокации используют либо видеоимпульсные сигналы (ВИС) (сигналы, содержащие 1...4 периода высокочастотного колебания), либо сложные сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) или ступенчатой частотной модуляцией (СЧМ) (подробнее см. [1, 7, 8]). Типичный вид функции отклика точечной цели (ФОЦ), соответствующей сигналам ВИС или сложным сигналам после сжатия (согласованной фильтрации), представлен на рис. 2.

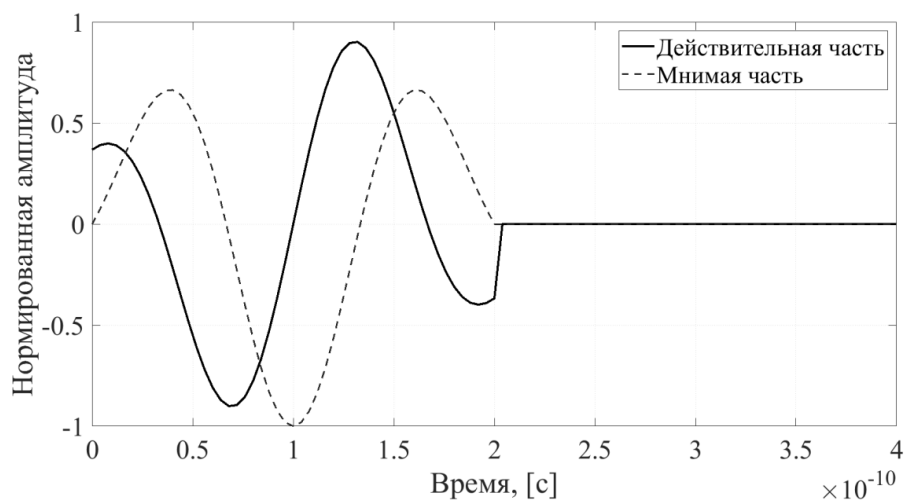


Рис. 2. Видеоимпульсный комплексный сигнал: действительная часть – сплошная линия; мнимая часть – штриховая линия.

Соотношение для математической модели комплексной огибающей подобных сигналов можно представить в виде:

$$s_0(t) = a_0 \exp \left[- \left(2 \frac{t - 0,5\tau}{\tau} \right)^2 \right] \exp(j2\pi f_0 t), \quad (1)$$

где a_0 – амплитуда сигнала, параметр τ определяет длительность сигнала, а f_0 – значение высокочастотного заполнения. При этом разрешающая способность по дальности для сигнала (1) равна:

$$\Delta R = \frac{c_c \tau}{2}, \quad (2)$$

где $c_c = c_0 / \sqrt{\varepsilon_c}$, c_0 – скорость распространения радиоволн в среде и в вакууме соответственно; ε_c – диэлектрическая проницаемость среды.

Вид зависимости z -координаты максимального пика ФОЦ для точечной цели, расположенной в точке $\mathbf{P}_0 = (x_{k_0}, y_{l_0}, z_{m_0})$, легко получить из геометрических соотношений:

$$z_T(x_k) = \sqrt{z_{m_0}^2 + (x_{k_0} - x_k)^2}, \quad k = k_0, k_0 \pm 1, k_0 \pm 2, \dots, \quad (3)$$

для сечения РЛИ в плоскости xOz и:

$$z_T(y_l) = \sqrt{z_{m_0}^2 + (y_{l_0} - y_l)^2}, \quad l = l_0, l_0 \pm 1, l_0 \pm 2, \dots, \quad (4)$$

для сечения РЛИ в плоскости yOz .

Соотношения (3), (4) описывают гиперболу, вершина которой совпадает с положением точки отражения \mathbf{P}_0 . Для этого случая вид РЛИ в виде сечения в плоскости xOz (координата $y_{l_0} = 0$) представлен на рис. 3. При расчетах полагалось: глубина цели $z_{m_0} = 0,5$ м; область зондирования – куб размерами $1 \times 1 \times 1$ м; среда зондирования – сухой песок со значением $\varepsilon_c = 2,6$; шаг перемещения антенной системы $\Delta x = 0,02$ м. Использованы параметры зондирующего сигнала, описываемого соотношением (1): $\tau = 0,2$ нс (разрешающая способность по дальности ≈ 3 см), частота $f_0 = 5$ ГГц. Размеры изображений на рис. 3 равны 200×200 пикселей.

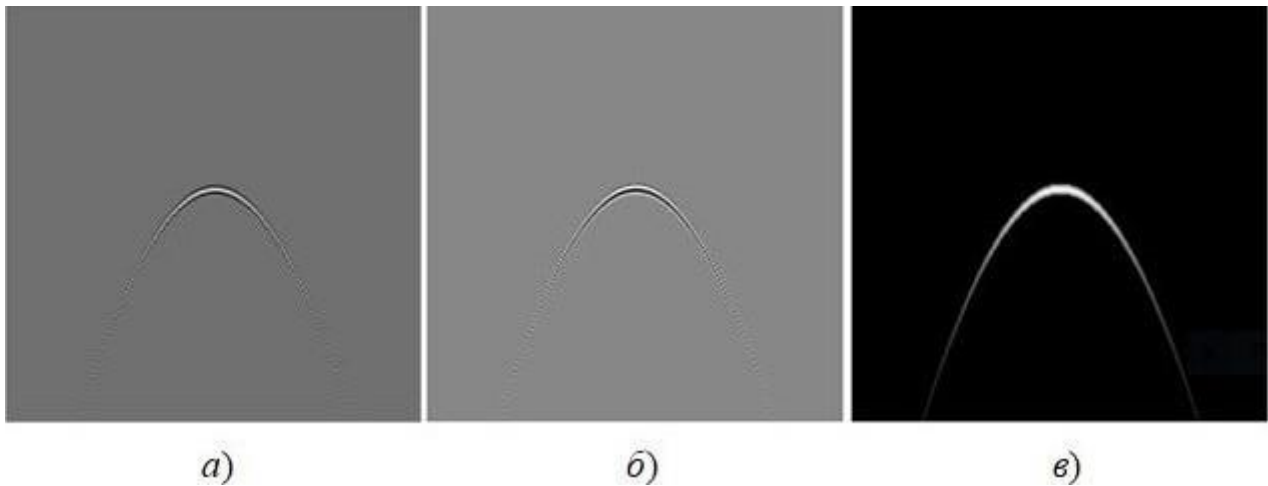


Рис. 3. Функция отклика точечной цели в сечении РЛИ плоскостью xOz :
 а) действительные значения; б) мнимые значения; в) абсолютные значения.

Следует отметить, что при формировании РЛИ путем компьютерного моделирования необходимо учитывать не только положение ФОЦ в кубе данных \mathbf{S} , но также и амплитуду a_0 сигнала $s_0(t)$, которая зависит от вида диаграммы направленности (ДН) передающей и приемной антенн, углов видимости точки отражения из центра антенной системы, расстояния до точки отражения и коэффициентов затухания радиоволн в среде и в материале объекта. Подробное описание этих процессов и методики соответствующих расчетов содержится в [1-3] и здесь рассматриваться не будет.

Используя метод геометрической оптики, можно получить аналитические зависимости для координат и амплитуд пиковых значений ФОЦ, соответствующих объектам простой геометрической формы в виде сферы, прямоугольного параллелепипеда, цилиндра и др. [6]. В частности, для сферы радиуса r с центром в точке $\mathbf{P}_0 = (x_{k_0}, y_{l_0}, z_{m_0})$, нетрудно получить зависимости z -координаты положения ФОЦ $z_{\text{в}}(x_k)$ верхней (внешней) и $z_{\text{н}}(x_k)$ нижней (внутренней) поверхности сферы от координаты x_k точки зондирования для сечения РЛИ плоскостью xOz (предполагается, что координата $y_{l_0} = 0$):

$$z_{\text{в}}(x_k) = z_{\text{т}}(x_k) - (r/2), \quad z_{\text{н}}(x_k) = z_{\text{т}}(x_k) + (r/2), \quad k = k_0, k_0 \pm 1, k_0 \pm 2, \dots, \quad (5)$$

где значения $z_{\text{т}}(x_k)$ вычисляются согласно (3). Заметим, что амплитуды сигналов, отраженных от нижней части сферы имеют существенно меньшее

значение амплитуды, чем от верхней части, из-за большей длины пути и дополнительного затухания радиоволн в среде сферы.

На рис. 4 представлены РЛИ сигналов (действительная (а), мнимая (б) составляющие и абсолютные значения (в)) в виде сечения плоскостью xOz . Радиус сферы задан $r = 5$ см, глубина ее центра $z_{m_0} = 0,5$ м, остальные параметры среды и зондирующего сигнала приняты такими же, как и для точечного отражателя на рис. 3. Отличие амплитуд сигналов от верхней и нижней границ сферы составляет примерно 7 дБ.

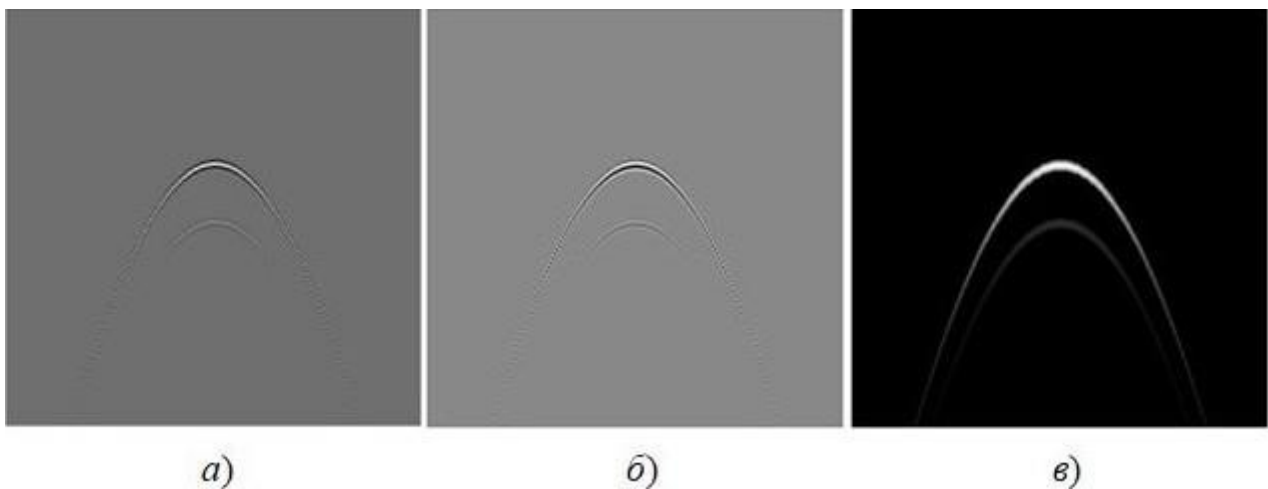


Рис. 4. Сечения РЛИ в плоскости xOz при наблюдении объекта в виде сферы: а) действительные значения; б) мнимые значения; в) абсолютные значения.

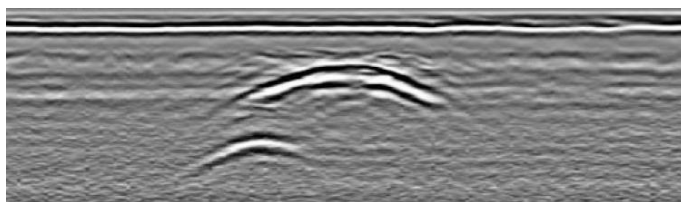
По сравнению с РЛИ точечного отражателя для объекта в виде сферы (см. рис. 3 и рис. 4) имеют место следующие отличия: 1) ширина гиперболы увеличивается по мере увеличения радиуса сферы; 2) появляются два отклика – от верхней и нижней границы сферы, причем нижний имеет существенно меньшую амплитуду сигнала, а для сферы из проводящего материала этот отклик вовсе отсутствует.

Заметим, что для анализа РЛИ с целью обнаружения и распознавания подповерхностных объектов совместно используются как вертикальные, так и горизонтальные сечения трехмерного куба данных. В последнем случае такие сечения соответствуют двумерному изображению отсчетов $s(k, l, m_0)$ матрицы \mathbf{S} для фиксированной глубины среды z_{m_0} .

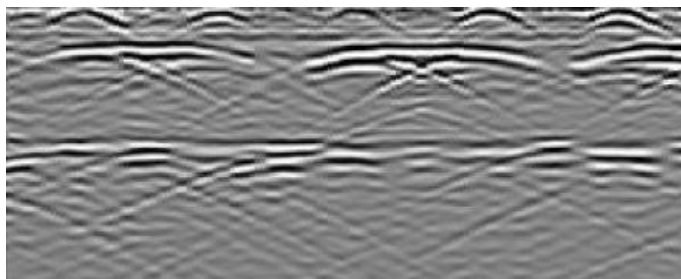
2. Методика моделирования двумерных радиолокационных изображений

Принцип формирования сигналов, описанный в разделе 1, учитывает лишь полезные сигналы и основан на использовании модельной ФОЦ (или их комбинаций), принимаемой в каждой точке зондирования. Далее, ограничиваясь двумерными радиолокационными изображениями простейших объектов, рассмотрим возможности получения реалистичных РЛИ с учетом особенностей среды распространения радиоволн.

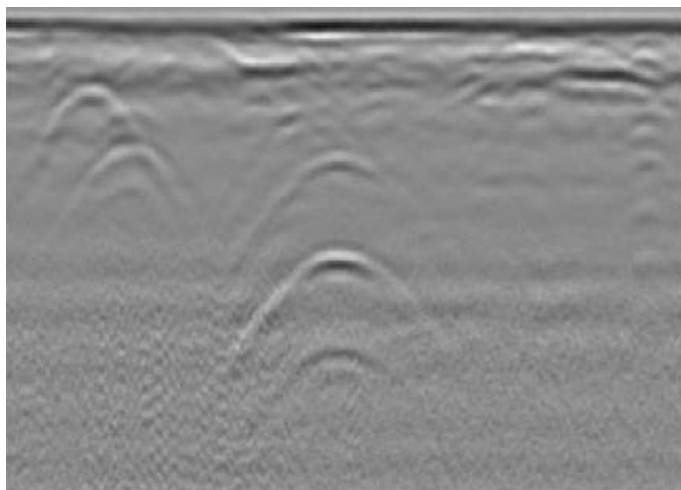
Рассмотрим примеры РЛИ в виде вертикальных сечений, представленные на рис. 5, которые взяты из [2, 3, 6]. На рис. 5а, б, в представлены РЛИ, полученные в результате натуральных экспериментов. На этих рисунках видно, что малоразмерные объекты создают линии в виде гипербол. Однако кроме линий, соответствующих отражениям от подповерхностных объектов, существенное значение имеет и общий фон РЛИ, т.к. его вид и свойства оказывают большое влияние на эффективность процедуры обнаружения и распознавания объектов. Моделирование только полезных сигналов, соответствующих подповерхностным объектам, приводит к РЛИ вида рис. 5г (результат компьютерного моделирования только сигналов объектов интереса, соответствующих натурному эксперименту для рис. 5в, на основе материалов [6]), которые, очевидно, далеки от реалистичных изображений. Аналогичный путь моделирования РЛИ использован также и в [9].



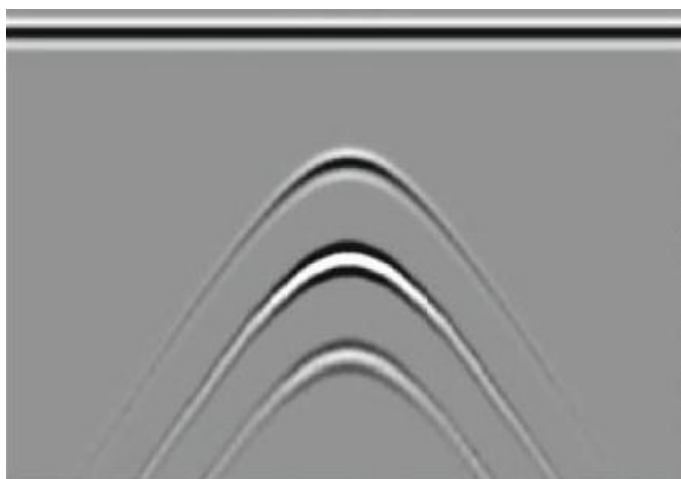
a)



б)



в)



г)

Рис. 5. Примеры РЛИ подповерхностных объектов в виде сечений в вертикальной плоскости: (*a*, *б*, *в*) – результаты натуральных экспериментов; (*г*) – компьютерное моделирование.

Анализ РЛИ, аналогичных рис. 5а, б, в, показывает, что при зондировании различных плотных сред вид общего фона РЛИ определяется двумя важными особенностями: 1) неоднородностью электрических свойств среды; 2) наличием мелких, хаотично расположенных отражателей, создающих сигналоподобные помехи.

Рассмотрим подробно каждую из указанных особенностей и предлагаемую методику моделирования соответствующих сигналов.

3. Неоднородность электрических свойств среды

Неоднородности среды, характеризующиеся различной формой и протяженностью, можно моделировать с помощью двумерного случайного процесса (СП) с различными корреляционными свойствами по обеим осям. С точки зрения удобства формирования и возможностей задания широкого диапазона различных свойств СП целесообразно использовать авторегрессионные (АР) модели СП, в частности, линейную модель Хабиби [10, 11]. В этой модели элементы двумерной матрицы изображения $\mathbf{Q} = \{q_{mn}, m = 1, \dots, M, n = 1, \dots, N\}$ вычисляются по формулам:

$$q_{mn} = \rho_x q_{m-1, n} + \rho_y q_{m, n-1} - \rho_x \rho_y q_{m-1, n-1} + \sigma_0 \sqrt{(1 - \rho_x^2)(1 - \rho_y^2)} \xi_{mn}, \quad (6)$$

где значения $\rho_x, \rho_y \in [0, 1]$ равны коэффициентам корреляции СП по осям Ox (индекс n) и Oy (индекс m) соответственно; $\sigma_0 \sqrt{(1 - \rho_x^2)(1 - \rho_y^2)} \xi_{mn}$ – независимые гауссовские случайные величины с нулевым средним значением и дисперсией $\sigma_0^2(1 - \rho_x^2)(1 - \rho_y^2)$, σ_0^2 – мощность теплового (белого) шума. В (6) предполагается, что $q_{mn} = 0$, если хотя бы один из индексов $m, n = 0$. Заметим, что при $\rho_x = \rho_y = 0$ СП (6) соответствует модели теплового шума.

Задавая различные значения параметров ρ_x, ρ_y, σ_0 , можно получать РЛИ различной текстуры. В случае РЛИ большой размерности с целью уменьшения крутизны резких переходов целесообразно проводить сглаживание изображения путем фильтрации с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ). Методика такой

фильтрации изображений подробно изложена в [12-14]. В данной работе использован ФНЧ Гаусса с частотой среза d_0 (относительное значение частоты среза равно $\tilde{d}_0 = d_0 / M$ при $M = N$), см. [14].

Регулирование степени влияния неоднородности на итоговом РЛИ можно осуществить путем изменения контраста изображения, которое реализуется с помощью методов гистограммной обработки [12, 14]. Если диапазон яркости изображения находится в интервале $[0, 1]$, то простым способом регулировки контраста является линейное преобразование значений яркости пикселей q_{mn} ($m = 1, \dots, M, n = 1, \dots, N$) по формуле:

$$q'_{mn} = q_{mn} + \gamma(0,5 - q_{mn}), \quad (7)$$

где параметр $\gamma \in [0, 1]$ определяет степень уменьшения контраста изображения.

На рис. 6 приведены примеры формирования изображений в виде матрицы \mathbf{Q} при вычислении элементов q_{mn} согласно (6): (a, z) – без фильтрации и изменения контраста; (b, d) – после фильтрации; (e, e) – после фильтрации и изменения контраста. Верхний ряд изображений на рис. 6 (изображения a, b, e) соответствуют значениям $\rho_x = \rho_y = 0,9$, а нижний ряд (изображения z, d, e) – значениям $\rho_x = \rho_y = 0,99$. Во всех случаях использовано значение $\sigma_0 = 10$.

На рис. 6 размеры всех изображений составляют $M = N = 200$ пикселей. При фильтрации с помощью ФНЧ Гаусса выбрана частота среза $\tilde{d}_0 = 0,05$ ($d_0 = 10$), а при уменьшении контраста путем преобразования (7) задано значение параметра $\gamma = 0,5$.

Путем варьирования параметров модели АР СП, ФНЧ, и функции преобразования контраста возможно получение изображений различной текстуры, формы и степени неоднородности, соответствующих РЛИ практически любых встречающихся на практике сред.

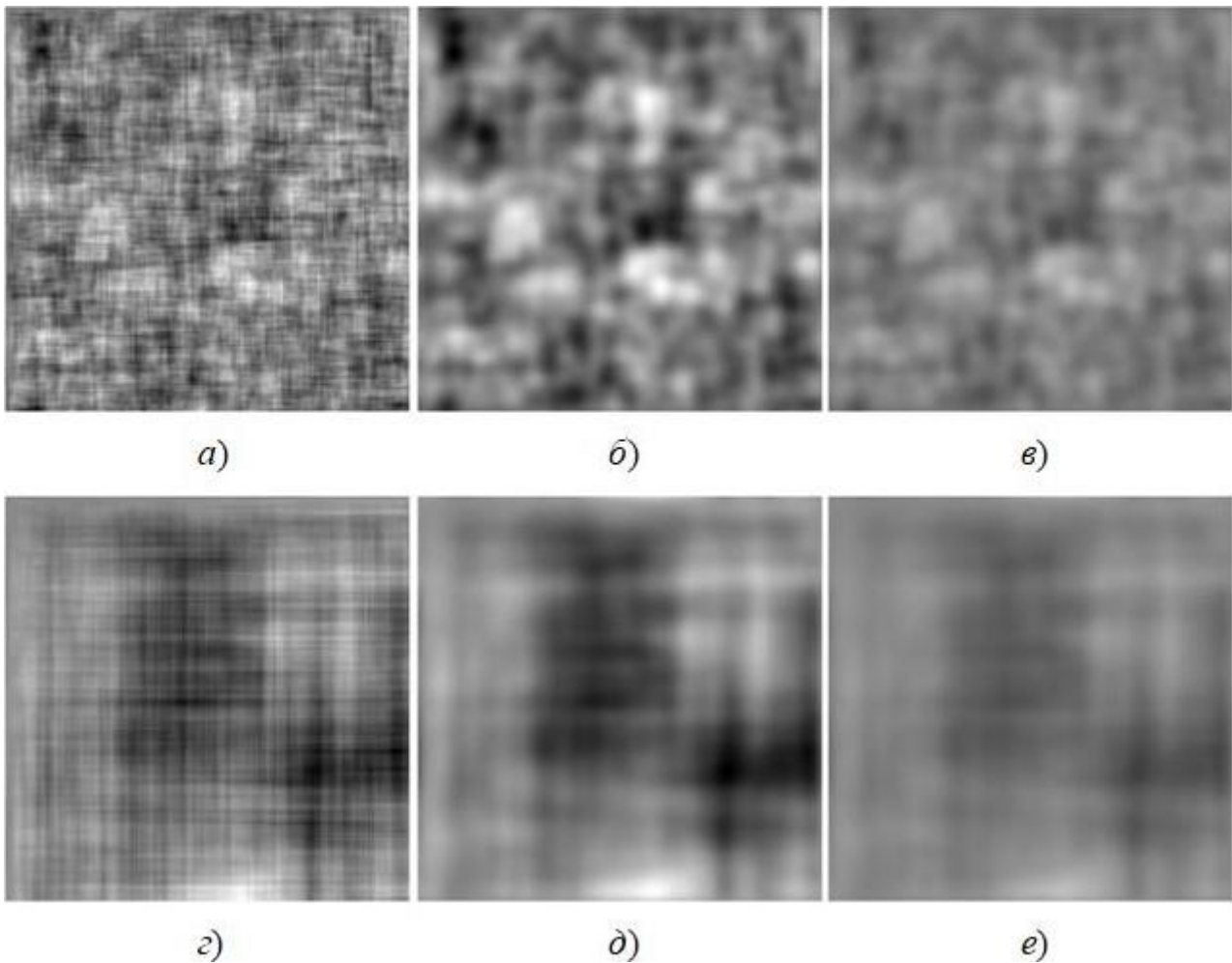


Рис. 6. Примеры изображений двумерных СП на основе модели Хабиби: (а, б, в) – при значениях $\rho_x = \rho_y = 0,9$; (г, д, е) – при значениях $\rho_x = \rho_y = 0,99$; (а, г) – без фильтрации; (б, д) – после фильтрации; (в, е) – после фильтрации и уменьшения контраста.

4. Моделирование помеховых сигналов

Помехи на изображениях РЛИ представляют собой множество сигналов, соответствующих отражениям от мелких элементов среды, которые можно рассматривать как точечные отражатели. Сигналы таких отражателей в большинстве случаев имеют амплитуду, существенно меньшую, чем полезный сигнал. В таких средах, как песок, почва, глина, бетон, кирпичная кладка и др. число мелких отражателей может быть очень велико и исчисляется значениями от нескольких сотен до десятков тысяч на 1 м^3 .

Таким образом, моделирование помеховых сигналов среды сводится к формированию множества сигналов ФОЦ со случайными значениями амплитуд

и случайным распределением координат в заданном объеме. Диапазон значений амплитуд Δ_a и среднее число отражателей V_1 на 1 м^3 являются параметрами, определяющими уровень помех на моделируемом РЛИ.

Заметим, что аналогичная методика моделирования помех используется и в обычной радиолокации при зондировании воздушного пространства, содержащего метеообразования. В этом случае помехи представляют собой сигналоподобные процессы, соответствующие отражениям от большого количества капель воды [15].

На рис. 7 приведены примеры моделирования помеховых отражений в среде типа сухой песок ($\varepsilon_c = 2,6$) – вертикальные сечения РЛИ. Диапазон изменения амплитуд задан равным $(0, A_{\max}]$, где A_{\max} в 5 раз меньше ожидаемой амплитуды полезного сигнала, и среднее число отражателей $V_1 = 10^4$.

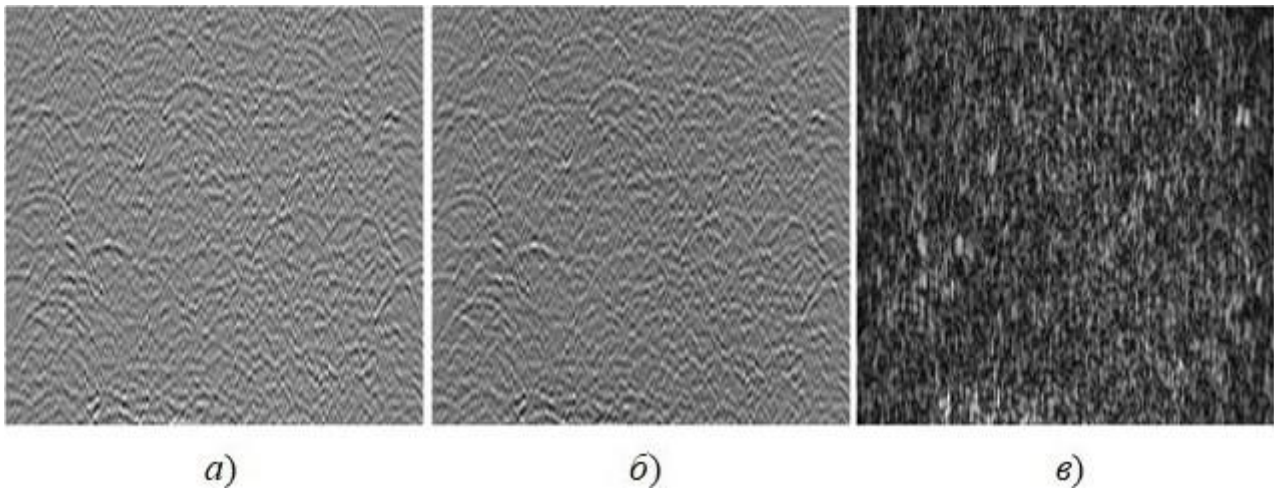


Рис. 7. Сечения РЛИ в вертикальной плоскости при моделировании только помеховых сигналов: а) действительные значения; б) мнимые значения; в) абсолютные значения.

Итоговое РЛИ, содержащее полезные сигналы, помеховые сигналы и учитывающее неоднородность параметров среды, может быть получено путем аддитивного наложения трех изображений, полученных путем моделирования двумерных матриц сигналов согласно описанной методике. При сложении изображений целесообразно использовать весовое суммирование, учитывающее степень влияния на итоговое РЛИ каждого из парциальных изображений.

На рис. 8 приведены примеры моделирования РЛИ размером $M = N = 200$ пикселей, представленные в виде сечений вертикальной плоскостью. На всех рисунках использованы только действительные составляющие сигналов.

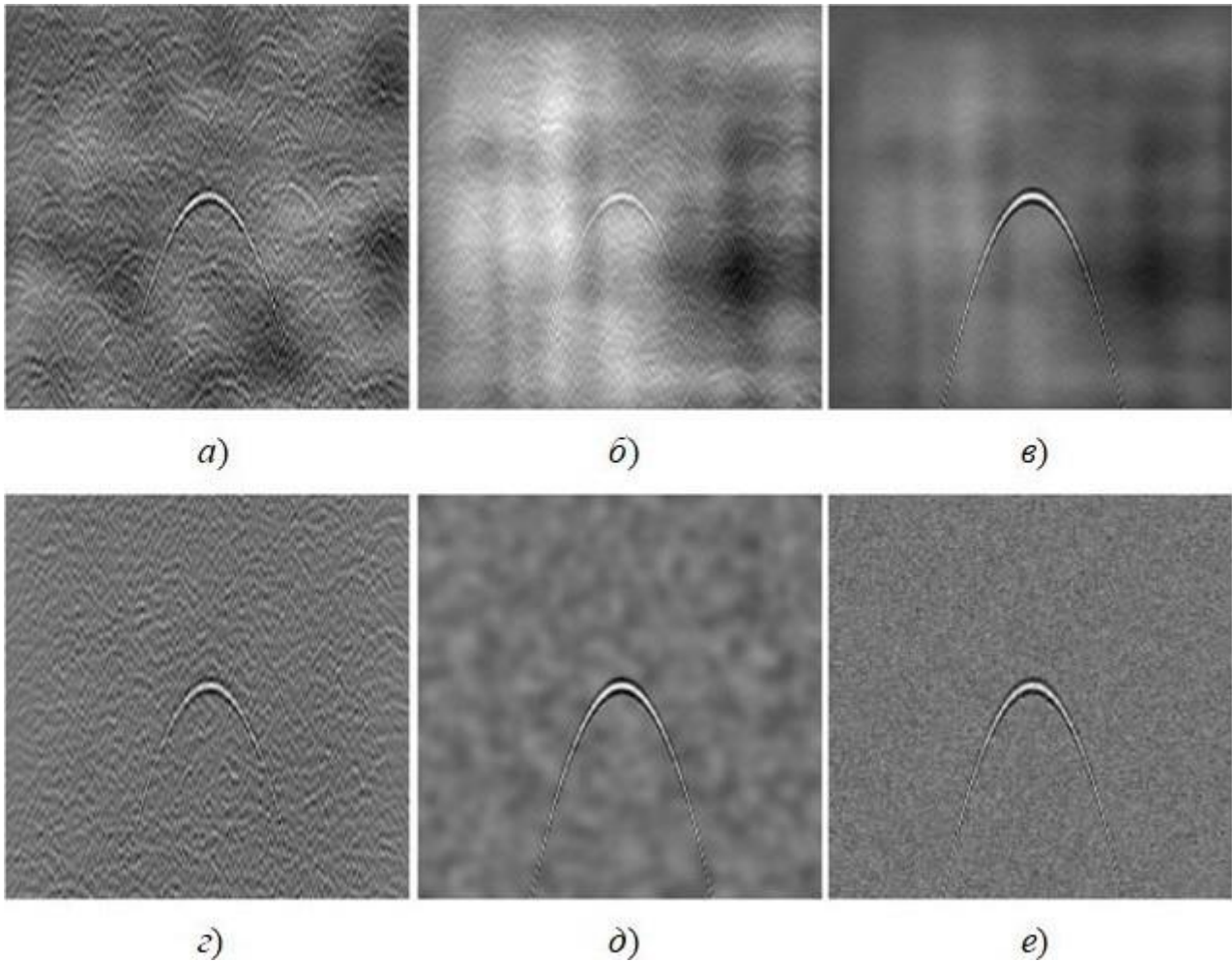


Рис. 8. Примеры моделирования РЛИ (действительные значения):

- a)* $\rho_x = \rho_y = 0,9$, $V_1 = 10000$, $\mathbf{S} + 5.0 \times \mathbf{Q} + \mathbf{C}$;
- б)* $\rho_x = \rho_y = 0,99$, $V_1 = 10000$, $\mathbf{S} + 5.0 \times \mathbf{Q} + \mathbf{C}$;
- в)* $\rho_x = \rho_y = 0,99$, $V_1 = 50000$, $\mathbf{S} + \mathbf{Q} + 0.1 \times \mathbf{C}$;
- г)* $\rho_x = \rho_y = 0,99$, $V_1 = 50000$, $\mathbf{S} + \mathbf{C}$;
- д)* $\rho_x = \rho_y = 0$, $\mathbf{S} + 2 \times \mathbf{Q}$ с ФНЧ;
- е)* $\rho_x = \rho_y = 0$, $\mathbf{S} + 2 \times \mathbf{Q}$ без ФНЧ.

При фильтрации с помощью ФНЧ относительная частота среза $\tilde{d}_0 = 0,05$, а параметр уменьшения контраста матрицы \mathbf{Q} равен $\gamma = 0,5$. Матрицы сигнала, неоднородности среды и помех обозначены \mathbf{S} , \mathbf{Q} и \mathbf{C} соответственно, числовые

коэффициенты перед этими матрицами равны их весовым коэффициентам (см. подписи к рис. 8).

Таким образом, с помощью весовых коэффициентов можно варьировать вклад различных особенностей среды в итоговое РЛИ. Так, на рис. 8 *в* вклад помех в итоговое РЛИ почти незаметен, т. к. весовой коэффициент матрицы S в 10 раз меньше коэффициентов матриц S и Q . Иная ситуация наблюдается на рис. 8 *г*, где матрица неоднородностей среды Q в итоговом РЛИ отсутствует.

Особо следует отметить изображения на рис. 8*д, е*, которые соответствуют случаю наличия только теплового шума, т.к. оба коэффициента корреляции помех равны нулю. На рис. 8*д* шумовой процесс подвергнут фильтрации с помощью ФНЧ, на рис. 8*е* – фильтрация шума отсутствует. Такой подход соответствует наиболее простому методу моделирования РЛИ и поэтому часто используется при анализе процедур обнаружения и распознавания сигналов различных подповерхностных объектов.

Предложенная методика моделирования РЛИ подповерхностных объектов совместно с их помеховым фоном позволяет создавать базу данных реалистичных изображений, которые, как в работах [16-18] используются для обучения, тестирования и оценки вероятностных показателей качества работы различных нейросетевых алгоритмов обработки изображений.

Заключение

Описана методика моделирования двумерных радиолокационных изображений (РЛИ) при зондировании плотных сред типа песок, почва, бетон, кирпичная кладка и др. Задача формирования подобных изображений путем статистического моделирования является актуальной при оценке эффективности процедур обнаружения и (или) распознавания заданных объектов на РЛИ, когда число изображений, необходимых для обучения или тестирования алгоритмов, исчисляется сотнями или тысячами единиц. В качестве зондирующих радиолокационных сигналов использована модель видеоимпульсного сигнала длительностью порядка десятых долей наносекунды.

Основное внимание при разработке предложенной методики уделено вопросам моделирования фона изображения, на котором возможно присутствие сигналов от объектов, представляющих интерес. На основе анализа РЛИ различных сред сделан вывод о том, что картину основного фона можно представить в виде наложения сигналов двух видов: отражения от протяженных областей неоднородностей среды; отражения от множества мелких элементов среды, которые можно рассматривать как точечные отражатели.

Для каждого из двух видов сигналов описана процедура моделирования. Протяженные неоднородности среды предложено моделировать с помощью случайного процесса (СП) авторегрессии, который затем подвергается фильтрации с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ). Итоговое РЛИ СП после фильтрации подвергается преобразованию гистограммы с целью изменения контраста изображения. Различные параметры такого преобразования – коэффициенты корреляции СП, частота среза ФНЧ и параметр уменьшения контраста, – позволяют получать РЛИ фона среды различной текстуры.

Второй вид сигналов (помеховые сигналы) предложено моделировать путем наложения большого числа функций отклика цели (ФОЦ), имеющих случайные значения амплитуд и координат внутри области зондирования. Параметром, определяющим интенсивность помех такого вида, является среднее число отражателей на единицу объема.

Итоговое РЛИ формируется как аддитивная сумма изображений трех видов – изображения полезных сигналов (отражения от подповерхностных объектов, представляющих интерес); фоновое изображение, характеризующее неоднородности среды; помеховые отражения от мешающих объектов среды малого размера. При суммировании этих изображений используются весовые коэффициенты, которые определяют вклад каждого изображения в итоговое РЛИ.

Приведены примеры формирования РЛИ каждого из трех видов. В качестве полезных сигналов рассмотрены отражения от простейших объектов – точечного отражателя и сферы. Основное внимание уделено вопросам

моделирования фона. Показано, что путем варьирования параметров СП, частоты среза ФНЧ, параметра уменьшения контраста, плотности распределения помеховых отражателей возможно получение РЛИ различной текстуры. При этом изображения для различных моделей фона представлены как по отдельности, так и в виде суммарного (итогового) РЛИ.

Литература

1. Финкельштейн М.И. и др. Подповерхностная радиолокация. – М.: Радио и связь. – 1994. – Т. 44.
2. Daniels D.J. (ed.). Ground penetrating radar. – Iet, 2004. – Vol. 1. <https://doi.org/10.1049/pbra015e>
3. Persico R. Introduction to ground penetrating radar: inverse scattering and data processing. – John Wiley & Sons, 2014. <https://doi.org/10.1002/arp.1756>
4. Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. – Москва: Питер, 2025. – 480 с.
5. Аггарвал Чару. Нейронные сети и глубокое обучение: учебный курс. : Пер. с англ. – СПб. : ООО «Диалектика», 2020. – 752 с.
6. Goodman D. et al. GPR remote sensing in archaeology. – New York : Springer, 2013. – Vol. 9. – 233 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31857-3>
7. Чапурский В.В. Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем (3-е издание) / В.В. Чапурский. – Москва : Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2016. – 280 с. – ISBN 978-5-7038-4289-8. – EDN ZCOFQH.
8. Amin M.G. (ed.). Through-the-wall radar imaging. – CRC press, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315218144>
9. Annan P. Ground penetrating radar principles, procedures and applications // Sensors and software. – 2003. – Vol. 278.

10. Васильев К.К. Статистический анализ последовательностей изображений / К.К. Васильев, В.Р. Крашенинников. – Москва : Радиотехника, 2017. – 248 с. – ISBN 978-5-93108-160-1. – EDN YNCRIV.
11. Крашенинников В.Р. Статистические методы обработки изображений / В.Р. Крашенинников. – Ульяновск : Ульяновский государственный технический университет, 2015. – 167 с. – ISBN 978-5-9795-1451-2. – EDN WANGHN.
12. Гонсалес Р.С. Цифровая обработка изображений / Р.С. Гонсалес, Р.Е. Вудс. – Издание 3-е, исправленное и дополненное. – Москва : Рекламно-издательский центр "Техносфера", 2012. – 1104 с. – (Мир цифровой обработки). – ISBN 978-5-94836-331-8. – EDN TIKLUW.
13. Гонсалес Р.С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р.С. Гонсалес, Р.Е. Вудс, С.Л. Эддинс ; [пер. с англ. В.В. Чепыжова]. – Москва : Техносфера, 2006. – 615 с. – (Мир цифровой обработки). – ISBN 5-94836-092-X. – EDN QMQEFV.
14. Гаврилов К.Ю., Каменский И.В., Кирдяшкин В.В. Цифровая обработка изображений в Matlab. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2025. – 160 с.
15. Вайнштейн Л.А., Зубаков В.Д. Выделение сигналов на фоне случайных помех. – Сов. радио, 1960.
16. Ishitsuka K. et al. Object Detection in Ground-Penetrating Radar Images Using a Deep Convolutional Neural Network and Image Set Preparation by Migration // International Journal of Geophysics. – 2018. – Vol. 1. – 9365184. <https://doi.org/10.1155/2018/9365184>
17. Al-Nuaimy W. et al. Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition // Journal of applied Geophysics. – 2000. – Т. 43. – №. 2-4. – С. 157-165. [https://doi.org/10.1016/s0926-9851\(99\)00055-5](https://doi.org/10.1016/s0926-9851(99)00055-5)

18. Pham M.T., Lefèvre S. Buried object detection from B-scan ground penetrating radar data using Faster-RCNN // IGARSS 2018-2018 IEEE international geoscience and remote sensing symposium. – IEEE, 2018. – С. 6804-6807.
<https://doi.org/10.1109/igarss.2018.8517683>

Для цитирования:

Гаврилов К.Ю., Каменский И.В., Монахов М.Д., Дубовский А.А., Руденко Е.В., Балахнина Д.К. Моделирование двумерных изображений объектов при радиолокационном зондировании плотных сред // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 5.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.3>