

АНАЛИЗ НЕГАУССОВЫХ ПОЛЕЙ СИГНАЛОВ СТАТИСТИКАМИ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ

Введение

Георадар – это современный геофизический прибор, предназначенный для обнаружения различных объектов, в том числе неметаллических, в различных средах. Мобильность, относительная компактность и возможность проводить неразрушающий мониторинг среды с высокой детальностью делают его уникальным среди геофизического оборудования. Георадары используются для решения инженерно-геологических, гидрогеологических и поисковых задач. Основным недостатком геолокационного подповерхностного зондирования является неоднозначность интерпретаций отображений при обработке полученных данных.

В статье предложен метод выделения полезного отраженного негауссова сигнала среди гауссовых и слабо негауссовых помех и шумов. Путем статистического моделирования продемонстрированы возможности определения негауссовых областей в отображении данных. Проанализирована степень негауссовости данных полученных георадаром.

Проблемы интерпретации данных георадара

Метод георадиолокационного подповерхностного зондирования основан на исследовании распространения электромагнитных волн в среде. Сущность работы георадара заключается в излучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства. Такими границами раздела в исследуемых средах являются, например, контакт между сухими и влагонасыщенными грунтами (уровень грунтовых вод), контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мерзлыми и тальми грунтами, между коренными и рыхлыми породами.

Задачи, решаемые с помощью георадара, могут быть разделены на две большие группы по методикам исследований, способам обработки, типам отображения объектов исследования в поле электромагнитных волн и представления результатов. Первая группа включает в себя геологические, гидрогеологические и инженерно-геологические исследования. Вторая группа включает в себя поиск локальных объектов, обследование инженерных сооружений, нарушение штатной ситуации.

Сущность обработки георадиолокационных данных состоит, прежде всего, в выделении полезного сигнала на фоне помех и шумов. С помощью разнообразных способов преобразования сигналов, помехи стараются удалить из данных, ослабить или хотя бы распознать их на отображении отраженных сигналов [1 – 3].

При геологической интерпретации используются основные положения методики, разработанной в сейсморазведке и получившей название сейсмостратиграфии. При отсутствии геологических данных о разрезе интерпретация радарограмм может проводиться только на качественном уровне. Перед началом интерпретации необходимо убедиться в том, что отражающие горизонты на радарограмме являются однократными отражениями. При проведении георадарных исследований с ненаправленными антеннами на радарограммах могут фиксироваться интенсивные воздушные отражения (отражения от объектов, находящихся в воздухе – столбы, деревья, дома).

Анализ волновой картины на радарограмме заключается в расчленении разреза на ряд участков или областей, которые отличаются друг от друга характером рисунка волновой картины, либо поверхностями угловых несогласий, либо интенсивными отражающими горизонтами. Окончательную интерпретацию георадарных данных должен проводить квалифицированный геолог.

Имитационное моделирование георадиолокационного сканирования и обработка негауссовых сигналов

При анализе гауссовых и негауссовых процессов часто необходимо оценивать характеристики распределения плотности вероятности. Чем значительнее отклонение характеристик распределения от гауссова распределения, тем значительнее статистики высших порядков негауссовых процессов. Следовательно, для таких процессов выше эффективность использования статистик высших порядков в прикладных задачах анализа негауссовых процессов. О степени негауссовости можно судить по величинам коэффициентов асимметрии и эксцесса.

Многие полезные сигналы и помехи в радиолокации имеют негауссово распределение [4 – 6]. Как показано ниже, отображения сигналов, полученных с помощью георадаров, имеют гауссовы и негауссовы области, очевидно связанные с неоднородностями зондируемой среды. Поэтому представляет интерес исследовать имитационным моделированием способ выделения негауссовых областей в данных георадара. Рассмотрим задачу получения изображения модели негауссовых сигналов на фоне гауссова шума. Негауссов сигнал и шум были некоррелированным полем белого шума одинаковой мощности.

Во время моделирования в каждой точке поля генерировался сигнал или шум длиной 50 или 150 отсчетов, которые имитировали огибающую отраженных импульсов геолокатора. Полезный негауссовый сигнал имел гамма или равномерное распределение. Для выделения сигналов использовались статистики 3-го и 4-го порядков. В качестве статистик использовались коэффициенты асимметрии и эксцесса, которые рассчитывались для каждой точки поля с координатами (x, y) с использованием формул

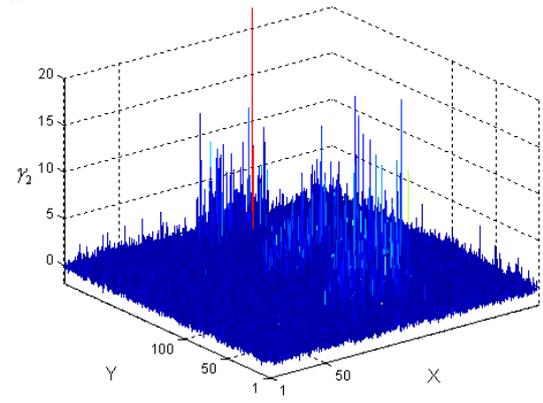
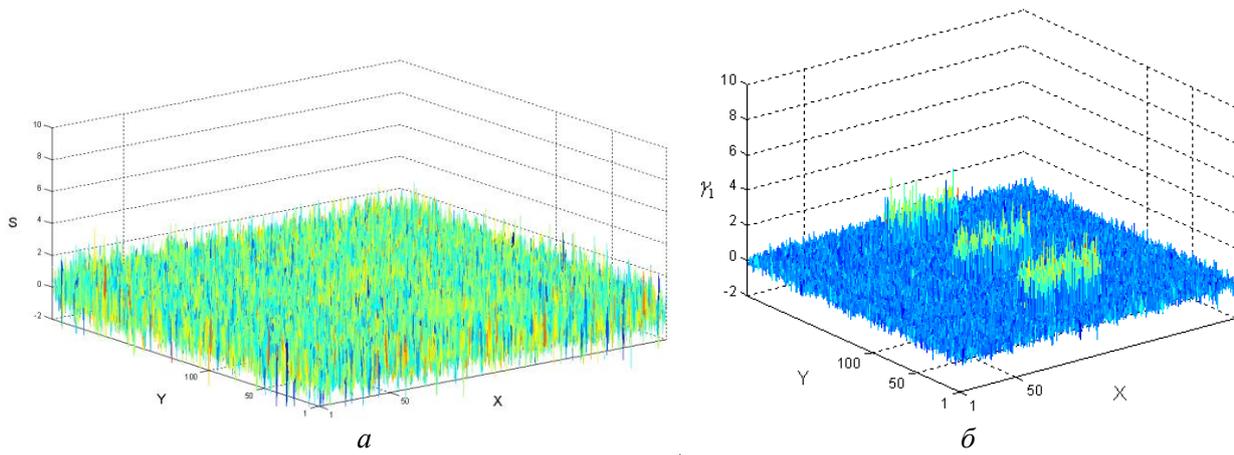
$$\gamma_1(x, y) = m_3(x, y) / \sigma^3(x, y) ,$$

$$\gamma_2(x, y) = m_4(x, y) / \sigma^4(x, y) - 3 ,$$

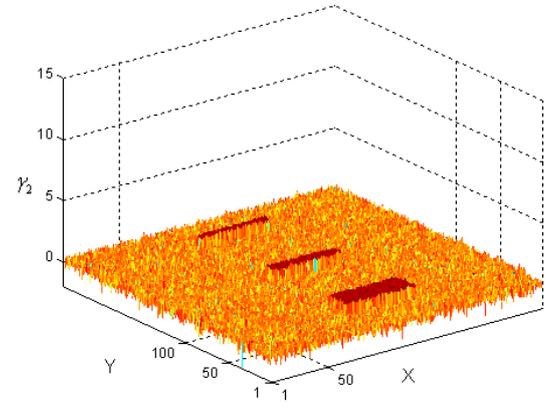
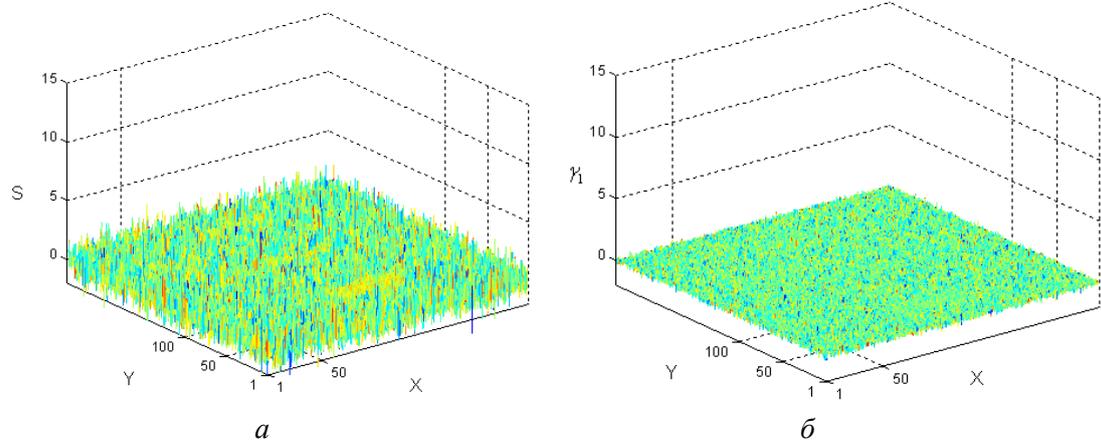
где $m_3(x, y)$ и $m_4(x, y)$ – центральные моменты третьего и четвертого порядков, $\sigma(x, y)$ – среднеквадратическое отклонение сигнала в точках поля с координатами x и y . Поля негауссова сигнала имели формы прямоугольников размерами: 22x60; 10x60; 6x60 точек отсчетов поля. Прямоугольники моделировали сечения труб одинаковой длины и разных диаметров при горизонтальном сканировании плоскости поля размером 240x240 отсчетов.

В первой модели в качестве полезного сигнала использовался негауссов белый шум с гамма-распределением. Выбором параметра формы задавалась степень негауссовости сигналов. На рис. 1 показано выделение сильно негауссова сигнала с гамма-распределением для параметра формы равного 1 при длине выборок 50 отсчетов. На рис. 1, *а* показано сечение поля сигналов; на рис. 1, *б* значения коэффициентов асимметрии во всех точках поля; на рис. 1, *в* показаны значения коэффициентов эксцесса. Анализ графиков показывает, что при одинаковом уровне мощности гауссова и негауссова сигнала области с негауссовыми свойствами заметно выделяются при использовании оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса даже при коротких пачках имитируемых отражений.

Во второй модели в качестве негауссова сигнала использовался белый шум с равномерным распределением (рис. 2). Сигнал был слабо негауссов, т.к. величина асимметрии для равномерного распределения равна нулю, а для эксцесса она составляет -1,8. Величины асимметрии и эксцесса рассчитывались в каждой точке поля по выборке, длина которой составляла 150 отсчетов.



в
Рис. 1



в
Рис. 2

Как видно из графиков, величины сигналов с гауссовым и негауссовым распределениями слабо отличаются (рис. 2, а). Величины оценок асимметрии у сигналов с гауссовым и негауссовым распределением близки к нулю (рис. 2, б). Оценки эксцесса в областях поля с негауссовым сигналом заметно выше, чем в областях поля с гауссовым распределением (рис. 2, в).

Анализ данных экспериментальной георадарной съемки

Экспериментальные данные были получены с помощью георадара с рабочей частотой 4 ГГц. Задача эксперимента заключается в обнаружении трех образцов ПВХ труб разного диаметра (10,8, 4,3, и 2,8 см), расположенных в деревянном ящике с песком. Сканирование производилось при различных условиях: в пустой коробке и в коробке, содержащей трубы. Георадар перемещался по одной линии по крышке коробки. Глубина зондирования составляла 0,5 м.

Данные представляют собой матрицу с числовыми значениями отраженных сигналов георадара в вертикальной плоскости (по глубине), с размерами 256x150 отсчетов. Визуальную оценку данных зондирования по интенсивности отраженных сигналов при наличии в коробке трех труб можно увидеть на рис. 3. Как видно на рис. 3, визуализированные данные без обработки не имеют каких-либо значительных элементов и отличий, позволяющих определить наличие и местоположение неоднородностей в коробке.

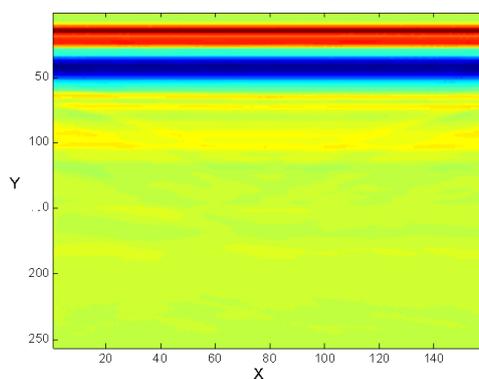


Рис. 3

Рассмотрим задачу анализа полученных сигналов с помощью асимметрии и эксцесса. Исследования показывают, что отраженный сигнал от пустой коробки имеет сложную структуру, связанную с наличием различных отражений, не являющихся полезным сигналом. Как отмечалось выше, в регистрируемом отраженном сигнале присутствует интенсивная составляющая, связанная с приходом прямой волны и явлением реверберации волны. Средняя трасса содержит, главным образом, волны-помехи. При зондировании в пустой коробке в отраженном сигнале присутствует ряд отражений, маскирующих полезный сигнал от неоднородностей среды. Для выделения полезного отраженного сигнала от труб и удаления помех было применено поточечное вычитание сигналов при наличии трех труб из сигналов, полученных в эксперименте с пустой коробкой. Такая процедура предварительной обработки несколько снизила уровень мешающих отражений.

Анализируемые сигналы представляют собой не огибающую пачку импульсов, а значения величины одного импульса, отраженного от разрешаемого объема. Поэтому для получения коэффициентов асимметрии и эксцесса по глубине зондирования применялось усреднение скользящим средним. При такой обработке на величины асимметрии и эксцесса в данной точке существенное влияние оказывали значения статистик на других глубинах.

Сигналы георадара обрабатывались методом скользящего среднего с длиной окна 150 отсчетов с шагом в один отсчет. Длина окна выбиралась с учетом глубины размещения труб. При такой обработке коэффициенты асимметрии и эксцесса не рассчитывались для глубин, не превышающих 149 отсчетов. Коэффициенты асимметрии и эксцесса пересчитывались при

перемещении георадара вдоль горизонтальной плоскости крышки коробки. Таким образом, были получены изображения полей отраженных сигналов в вертикальной плоскости для одной линии зондирования.

На рис. 4, *а, б* отображена визуализация обработанных данных. Значения асимметрии и эксцесса отображаются цветом. Чем выше значения коэффициентов в точках плоскости, тем ближе к голубой градации цвета. Изображения неоднородностей данных по асимметрии после вычитания из анализируемых сигналов, сигналов полученных для пустой коробки и использовании скользящего среднего, показаны на рис. 4, *а*. Аналогичные результаты, полученные для коэффициента эксцесса, представлены на рис. 4, *б*. Изображения полей сигналов были получены, когда в коробке находились все три трубы.

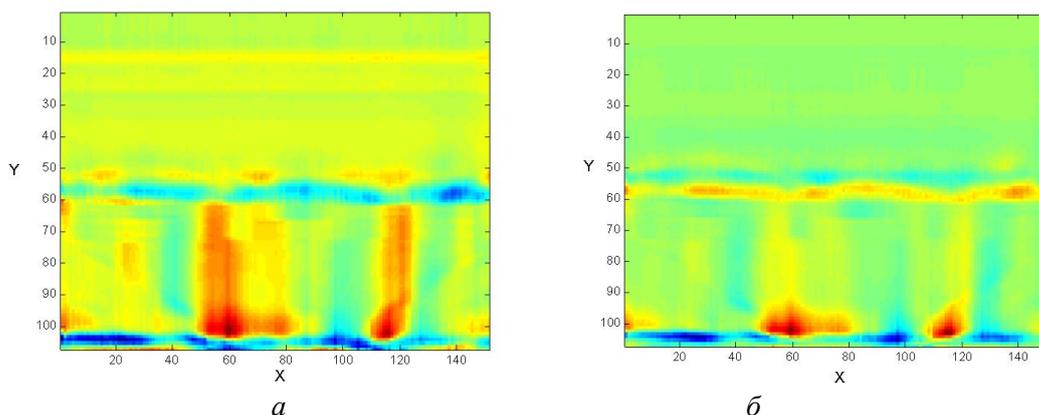


Рис. 4

Анализ изображения на рис. 4, полученного с помощью метода «скользящего среднего» и статистик высшего порядка, показывает, что на глубине 50-60 отсчетов становятся визуально заметны отраженные сигналы от верхней полусферы труб. Это демонстрирует перспективность метода «скользящего среднего» и применения статистик высших порядков для анализа изображений сигналов георадаров. Однако на практике, для дальнейшего совершенствования метода обнаружения объектов, необходимо получать оценки статистик по пачкам отраженных сигналов, как это продемонстрировано при имитационном моделировании.

Наиболее интересные результаты получены для оценок эксцессов отраженных сигналов на глубине размещения труб с различным содержимым коробки (рис. 5). На графиках наблюдаются заметные отличия оценок эксцесса экспериментальных данных. Значения эксцесса отражений, полученных для коробки содержащей трубы, ниже эксцесса сигнала для пустой коробки.

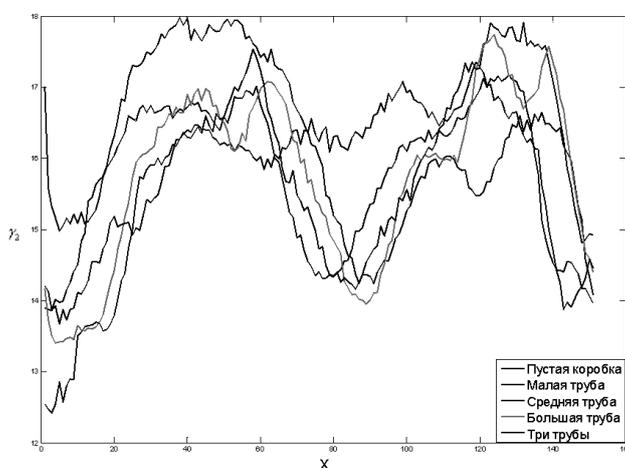


Рис. 5

Хотя результаты, представленные на рис. 4 и 5, не позволяют с высокой вероятностью определить местонахождение труб, наблюдается значительная неоднородность графиков эксцессов отраженных сигналов для коробки с трубами и их отличие от графиков эксцессов для пустой коробки. Это указывает на присутствие в коробке объектов и областей с гауссовыми и негауссовыми значениями оценок асимметрии и эксцесса отраженных сигналов.

Выводы

1. Наличие неоднородностей среды, отражающей зондирующие сигналы, может создавать гауссовы и негауссовы поля сигналов. Для их анализа эффективно использовать коэффициенты асимметрии и эксцесса.

2. Имитационное моделирование показало возможность выделения негауссовых областей на фоне сигналов с гауссовым распределением даже при коротких реализациях.

3. Анализ отражений, полученных с помощью георадара, показал заметную неоднородность по асимметрии и эксцессу полей данных. Применение вместо скользящего усреднения анализа пачки отраженных сигналов может повысить достоверность обнаружения невидимых под землей объектов.

Список литературы: 1. *Daniels D. J. Surface-Penetrating Radar.* – London: The Institution of Electrical Engineers, 1996. 2. *Подповерхностная радиолокация* / М. И. Финкельштейн, В. И. Карпунин, В. А. Кутев, В. Н. Метелкин. – М. : Радио и связь, 1994. – 216 с. 3. *Вопросы подповерхностной радиолокации* ; под ред. А.Ю. Гринева. – М. : Радиотехника, 2005. – 416 с. 4. *Шелухин О.И.* Негауссовские процессы в радиотехнике. – М. : Радио и связь, 1998. – 310 с. 5. *Карпов И.Г., Евсеев В.В., Мариненко А.С.* Различение сигналов на фоне узкополосных негауссовских помех // *Радиоэлектроника.* – 2004. – Т.47, № 3. – С. 33-41. (Изв. вузов). 6. *Кунченко Ю.П.* Нелинейная оценка параметров негауссовских радиотехнических сигналов. – К. : Выща шк., 1987. – 191с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 05.02.2016