

Научная статья

УДК 535.2

DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202503-03>

Применение математических методов для определения вступления сигнала под действием фонового поля (поля подсветки) при георадиолокационном зондировании

Я.В. Савватеев¹, С.В. Иляхин², Б.А. Корнилов³

¹ Институт Физики Земли имени О.Ю. Шмидта (Москва, Россия)

² Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (Москва, Россия)

³ Научно-технический кооператив «Диоген» (Москва, Россия)

¹ savvateev-yar@yandex.ru, ² isv11@mail.ru, ³ ntkdiogen48@mail.ru

Аннотация

Постановка проблемы. Разработка месторождений кристаллосырья сопровождается потерями полезного компонента, обусловленного невозможностью локализовать объекты поиска, применением формализованных статистических подходов к проектированию запасов месторождений и добыче минерального сырья. Применение геофизических методов с целью дистанционного обнаружения отдельных кристаллов во вмещающей породе, а также математических методов оптимизации определения полезного компонента позволит снизить потери и издержки добычи.

Цель. Разработать математический алгоритм отображения локальных объектов, действующий избирательно на объекты поиска с возможностью локализации исходя из физики процесса (образования дифрагированных волн, отображающих локальные объекты).

Результаты. Рассмотрена методика математического расчета отраженного сигнала георадиолокационного зондирования, отображаемого с применением методики использования фонового поля, влияющего на формирование дифрагированных волн на локальных объектах.

Практическая значимость. Предложенная методика может быть использована для автоматизации процесса картирования локальных объектов.

Ключевые слова

Частотный спектр, временной спектр, локальные объекты, аддитивный шум, операция свёртки, винеровская деконволюция, прямое преобразование Фурье, обратное преобразование Фурье

Для цитирования

Савватеев Я.В., Иляхин С.В., Корнилов Б.А. Применение математических методов для определения вступления сигнала под действием фонового поля (поля подсветки) при георадиолокационном зондировании // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. № 3. С. 12–21. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202503-03>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

Под воздействием фонового поля при георадиолокационном зондировании повышается временная разрешенность записи, облегчающая поисковые задачи. Для определения наличия аномалий, связанных с наличием локальных объектов, необходимо иметь объективный критерий для картирования объектов поиска. Одним из методов решения подобной задачи является метод винеровской деконволюции, заключающийся в операции свёртки трасс, полученных в стандартных условиях георадиолокационного зондирования и полученных под дополнительным действием фонового поля (поля подсветки).

Ц е л ь р а б о т ы – разработать математический алгоритм отображения локальных объектов, действующий избирательно на объекты поиска с возможностью локализации исходя из физики процесса (образования дифрагированных волн, отображающих локальные объекты).

Рассмотрены задача формирования дифрагированных волн при георадиолокационном зондировании под воздействием фонового электромагнитного поля, а также методика расчета локальных объектов при помощи математической операции свертки полученных трасс без воздействия фонового поля и под воздействием фоновых полей в программном пакете Matlab.

© Савватеев Я.В., Иляхин С.В., Корнилов Б.А., 2025

Отображение полезного сигнала при помощи математических методов

Разрешающая способность метода определяется различным расстоянием между пиками на шкале. Исходный спектр в процессе измерения прибором искажается, пики расплываются, т.е. их ширина увеличивается, и разрешающая способность процесса измерения заметно ухудшается. Функцию, характеризующую степень искажения формы пика прибором, принято называть *аппаратной функцией*. Очевидно, что для эффективного решения рассматриваемой задачи необходимо восстановить исходный спектр, неискаженный аппаратной функцией. Задача восстановления сигналов, искаженных прибором с конечной разрешающей способностью и при наличии шумов измерений, в общем случае сводится к решению линейного интегрального уравнения 1-го рода:

$$\int_a^b h(x, y)s(y)dy + n(x) = u(x), \quad c \leq x \leq d, \quad (1)$$

где $h(x, y)$ – аппаратная функция; $s(y)$ – искомая функция (сигнал); $u(x)$ – зарегистрированный прибором спектр; $n(x)$ – случайный шум измерения.

Если параметры прибора не зависят от времени, то аппаратная функция зависит только от разности аргументов

$$h(x, y) = h(x - y), \quad (2)$$

и интеграл в (1) становится интегралом свертки или конволюции (convolution). Поэтому задачу восстановления сигнала называют *деконволюцией*. Наличие составляющей шума в (1) обуславливает то, что задача восстановления сигнала является некорректной математической задачей [1, 2]. Такая задача не имеет точного решения и может быть решена только приближенно. При этом выбор критерия оценки приближения существенно влияет на результат решения задачи.

Задачей расшифровки спектра, как правило, является определение двух параметров для каждого спектрального пика: положение на шкале и величина (амплитуда или площадь) пика [3, 4]. Такую информацию можно представить как набор дельта-функций с соответствующими параметрами [5], который можно трактовать как исходный спектр $s(x)$ в выбранной математической модели. При этом аппаратная функция $h(x, y)$ в (1) будет характеризовать отклонение зарегистрированного спектра от такого «истинного» спектра, определяемое как параметрами прибора, так и физическими свойствами процесса.

Основой рассматриваемого способа является фильтр Винера, описываемый как

$$W(\omega) = \frac{H^*(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \frac{P_N(\omega)}{P_S(\omega)}}, \quad (3)$$

где $H(\omega)$ – фурье-образ аппаратной функции $h(t)$; $H^*(\omega)$ – сопряженная величина; $P_S(\omega)$ и $P_M(\omega)$ – спектральные плотности энергии сигнала и шума соответственно. Аппаратная функция $h(t)$ в рассматриваемой задаче соответствует по форме и ширине спектральному пику.

Основной трудностью применения фильтра Винера является необходимость определения спектральной плотности энергии сигнала и шума. В рассматриваемом случае при георадиолокационном зондировании искомым входным сигналом является последовательность дельта-функций [6] или импульсный процесс. Спектральная плотность такого процесса определяется следующим выражением:

$$P_S(\omega) = 2\nu a^2, \quad (4)$$

где ν – средняя частота событий (импульсов); a^2 – значение среднего квадрата амплитуд импульсов. Эти характеристики обычно можно определить из входных экспериментальных данных [7].

При восстановлении исходного сигнала используется несколько подходов.

Поскольку при поиске локальных объектов значительная часть полученных аномалий связана с явлениями дифракции электромагнитных волн, то восстановление распределения рассеивателей в про-

странстве или фокусировка радарограммы относятся к обратным задачам теории дифракции. Одним из эффективных методов решения является *метод пространственно-согласованной фильтрации или метод обратного распространения*, изначально разработанный для акустической голографии и основанный на принципах фурье-оптики [8–10].

Регистрируемая радарограмма представляет собой суперпозицию полей точечных рассеивателей:

$$E(x, y, 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x', y', d) \exp^{-i2k\sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + d^2}} dx'dy', \quad (5)$$

где $k = \frac{2\pi f\sqrt{\varepsilon}}{c}$ – волновой вектор; ε – диэлектрическая проницаемость зондируемой среды;

$\sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + d^2}$ – расстояние от каждого положения приемопередатчика (x', y', d) в выбранной области сканирования до каждой точки объекта.

В (5) не учитывается уменьшение амплитуды при распространении и отражении волны, поскольку для фокусировки радарограммы необходимо четко определить фазовые соотношения [11]. Сферические волны, переотраженные точечными рассеивателями, можно представить в виде суперпозиции плоских волн:

$$\exp^{-i2k\sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + d^2}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp^{-i(k_x(x'-x) + k_y(y'-y) + k_z d)} dk_x dk_y, \quad (6)$$

где $k_x, k_y, k_z = \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}$ – соответствующие компоненты волнового вектора.

Окончательное выражение представляет собой последовательное применение прямого двумерного преобразования Фурье, пространственно-согласованной фильтрации и обратного преобразования Фурье к функции отражательной способности объекта $\rho(x', y', d)$:

$$E(x, y, 0) = IFFT^2 \left[FFT^2 \left(\rho(x', y', d) \right) \exp^{-ik_z d} \right], \quad (7)$$

где $FFT^2[f(x, y)]$ – прямое двумерное преобразование Фурье от произвольной функции $f(x, y)$:

$$FFT^2 \left[f(x, y) \right] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp^{-i(k_x x + k_y y)} dx'dy'; \quad (8)$$

$IFFT^2[F(k_x, k_y)]$ – обратное двумерное преобразование Фурье от произвольного частотного спектра $F(k_x, k_y)$:

$$IFFT^2 \left[F(k_x, k_y) \right] = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_x, k_y) \exp^{-i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y. \quad (9)$$

Искомая функция примет следующий вид:

$$\rho(x', y', d) = IFFT^2 \left[FFT^2 \left(E(x, y, 0) \right) \exp^{-ik_z d} \right]. \quad (10)$$

В рассматриваемой схеме радиолокационного зондирования фазовый множитель имеет вид $\exp^{-ik_z d}$ и учитывает изменение фазы плоской волны, характеризуемой вектором распространения k , при прохождении заданного расстояния d , называемого *глубиной фокусировки*. Результат визуализации представляет собой полученное изображение в плоскости $z = d$.

На рис. 1 и 2 представлены профили георадиолокационного зондирования в отсутствие и под действием фонового поля соответственно.

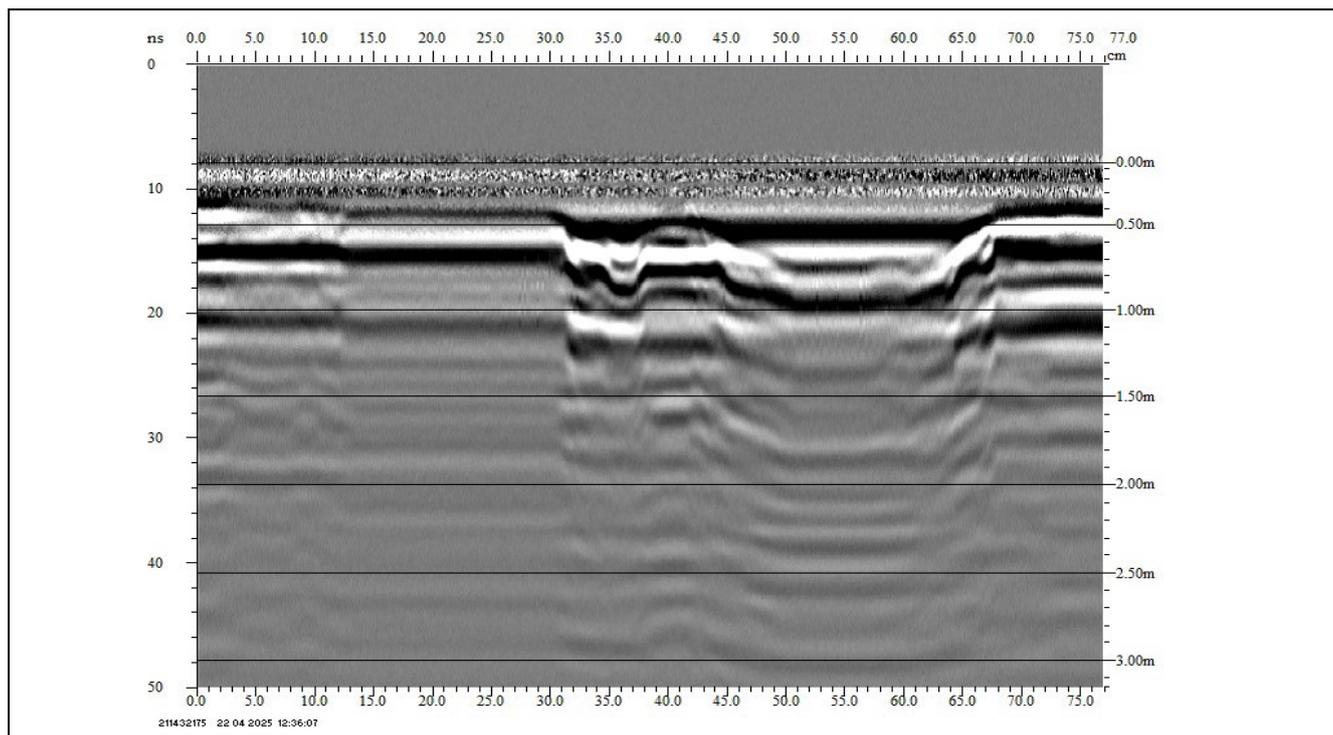


Рис. 1. Профиль георадиолокационного зондирования в отсутствие фонового поля (в непрерывном режиме)

Fig. 1. Profile of ground penetrating radar sounding in the absence of a background field (in continuous mode)

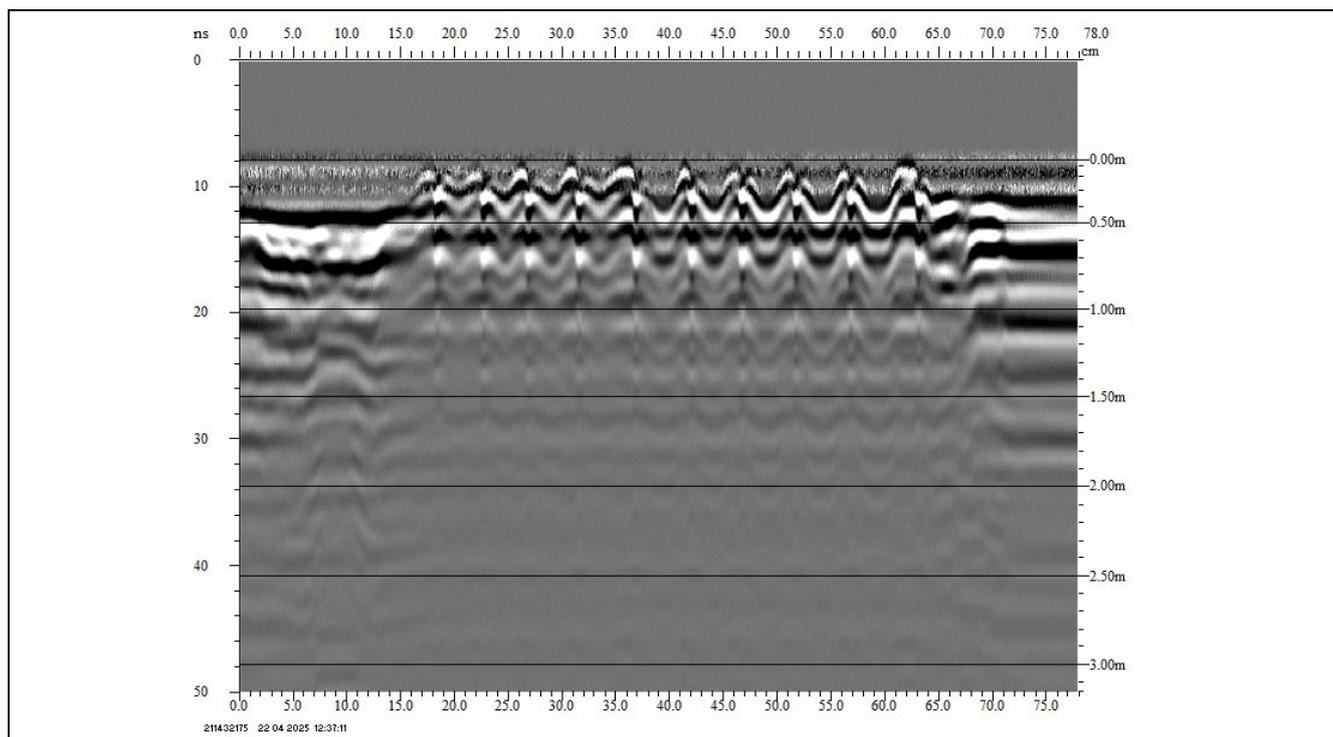


Рис. 2. Профиль георадиолокационного зондирования под действием фонового поля (происходит формирование дифрагированных волн, отображающих положение кристаллов). Запись сделана в непрерывном режиме

Fig. 2. Profile of ground penetrating radar sounding under the influence of a background field (formation of diffracted waves, displaying the position of crystals). The recording was made in continuous mode

Другой подход к получению исходного сигнала – *использование методов теории обработки сигналов*. В качестве искомого полезного сигнала рассматривается электромагнитное поле [12], создаваемое

источником в пределах области сканирования (x, y) на расстоянии d от антенны $p(x, y, d)$. Роль линейной системы с искажающей сигнал функцией $g(x, y, d)$ играет свободное пространство, в котором распространяется плоская волна, проходя расстояние d от источника до плоскости регистрации $z = 0$. Возникновение аддитивного шума $n(x, y)$ может быть связано с наличием маскирующих полезный сигнал отражений от неоднородностей в исследуемых образцах и т.д.

Модель искажения сигнала $f(x, y, 0)$, полученного в результате измерений, может быть представлена в следующем виде:

$$f(x, y, 0) = g(x, y, d) ** p(x, y, d) + n(x, y), \quad (11)$$

где $**$ – обозначение операции двумерной свертки (конволюции).

На основании теоремы о свертке выражение (11) представляется в частотной области как произведение фурье-спектра искомого сигнала $P(k_x, k_y, d)$ и спектра искажающей функции $G(k_x, k_y, d)$ с последующим добавлением спектра шума $N(k_x, k_y)$:

$$F(k_x, k_y, d) = P(k_x, k_y, d)G(k_x, k_y, d) + N(k_x, k_y), \quad (12)$$

где k_x, k_y – пространственные частоты, соответствующие координатам x, y .

Для оценки искажающей функции обычно используются экспериментальные измерения импульсного отклика системы при известных параметрах входного сигнала или математическое моделирование на основе известных физических принципов поведения системы [13]. В случае распространения плоской электромагнитной волны вдоль оси z от точечного источника до плоскости регистрации $z = 0$ запишем математическую модель спектра искажающей функции:

$$G(k_x, k_y, d) = \exp^{-ik_z d}, \quad (13)$$

где k_z – пространственная частота, соответствующая координате z ; знак «минус» означает, что распространение волны происходит против положительного направления оси z .

На рис. 3 и 4 представлены спектры исходной радарограммы, соответствующие отображению объектов в отсутствие и под действием фонового поля соответственно, откуда видно, что пики графиков приходятся на разные частоты.

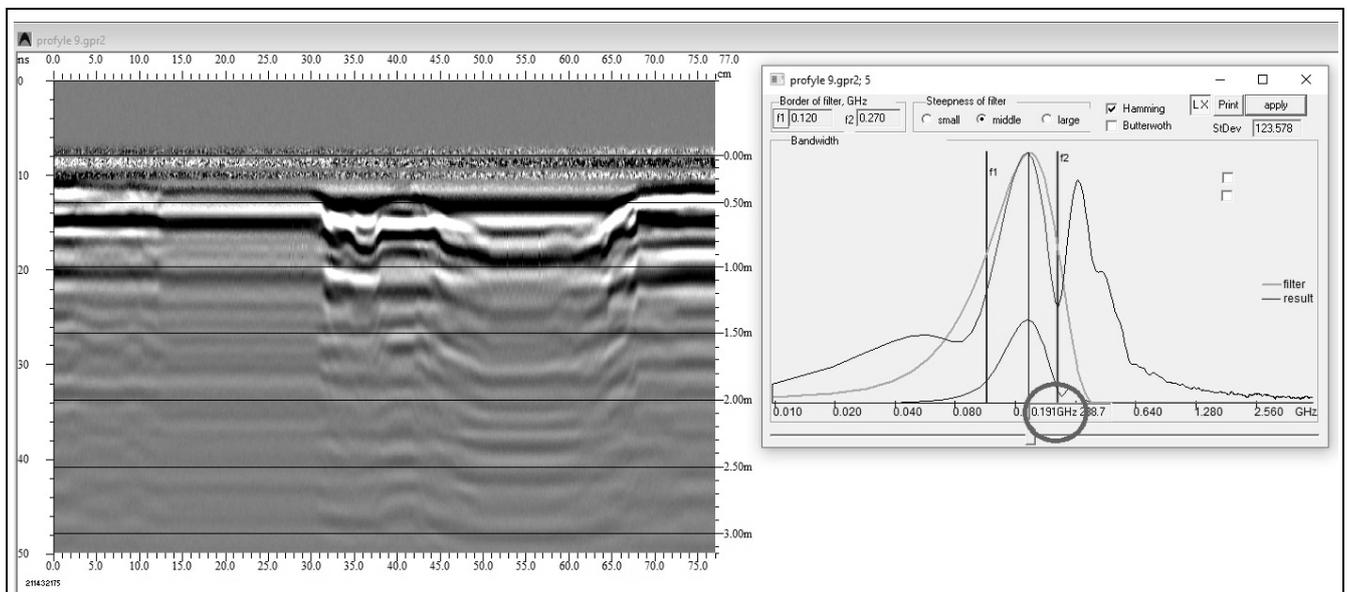


Рис. 3. Спектр исходной радарограммы, соответствующий отображению объектов в отсутствие фонового поля (пик соответствует частоте отраженного сигнала 191 МГц). Запись выполнена в непрерывном режиме

Fig. 3. Spectrum of the original radargram corresponding to the display of objects in the absence of a background field. (the peak corresponds to the frequency of the reflected signal 191 MHz). The recording was made in continuous mode

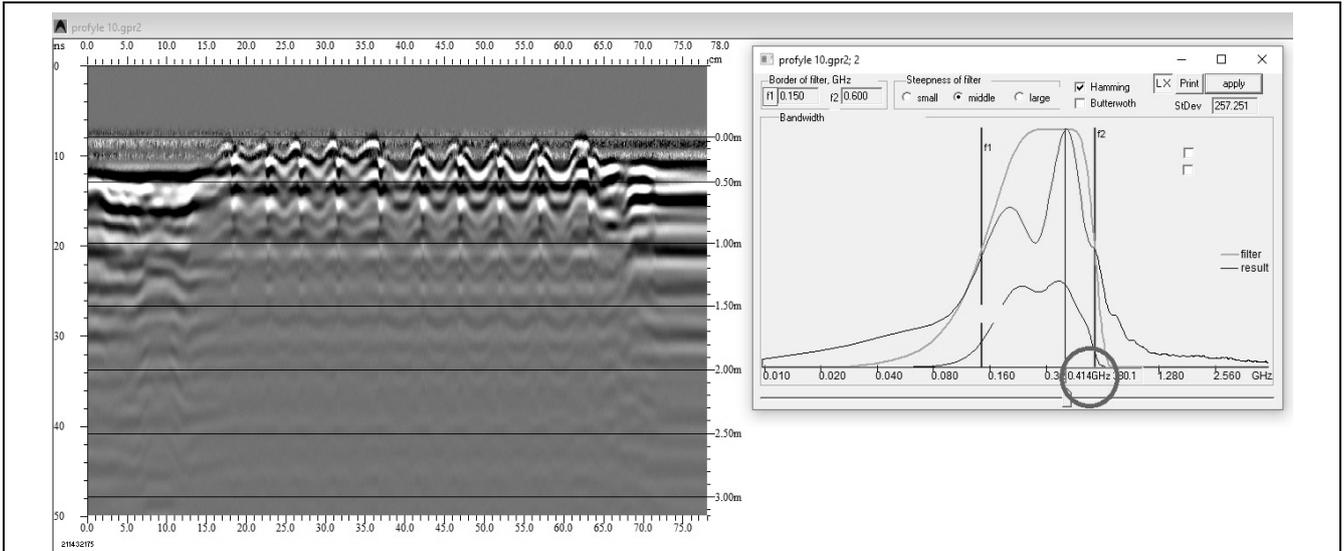


Рис. 4. Спектр исходной радарограммы, соответствующий отображению объектов под действием фонового поля (пик соответствует частоте отраженного сигнала 414 МГц). Запись выполнена в непрерывном режиме

Fig. 4. Spectrum of the original radargram corresponding to the display of objects under the influence of the background field (the peak corresponds to the frequency of the reflected signal 414 MHz). The recording was performed in continuous mode

При отсутствии аддитивного шума для восстановления неискаженного сигнала используется инверсная фильтрация:

$$\tilde{P}(k_x, k_y, d) = \frac{F(k_x, k_y, d)}{G(k_x, k_y, d)}, \quad (14)$$

где \tilde{P} – приближенное значение фурье-спектра искомого сигнала.

Для рассматриваемого случая визуально на радарограмме отмечаются локальные объекты (рис. 5), полученные при действии генератора фонового поля. Возможно, таких объектов больше, где можно отследить проявление полезного сигнала, а также уточнить наличие полезного сигнала в отчетливо заметных аномалиях. Для проверки этого предположения исследованы аналогичные трассы на профиле в отсутствие фонового поля и при прохождении профиля георадиолокационного зондирования с фоновым полем. Соответствующая операция свертки была проведена в программном пакете Matlab (рис. 6).

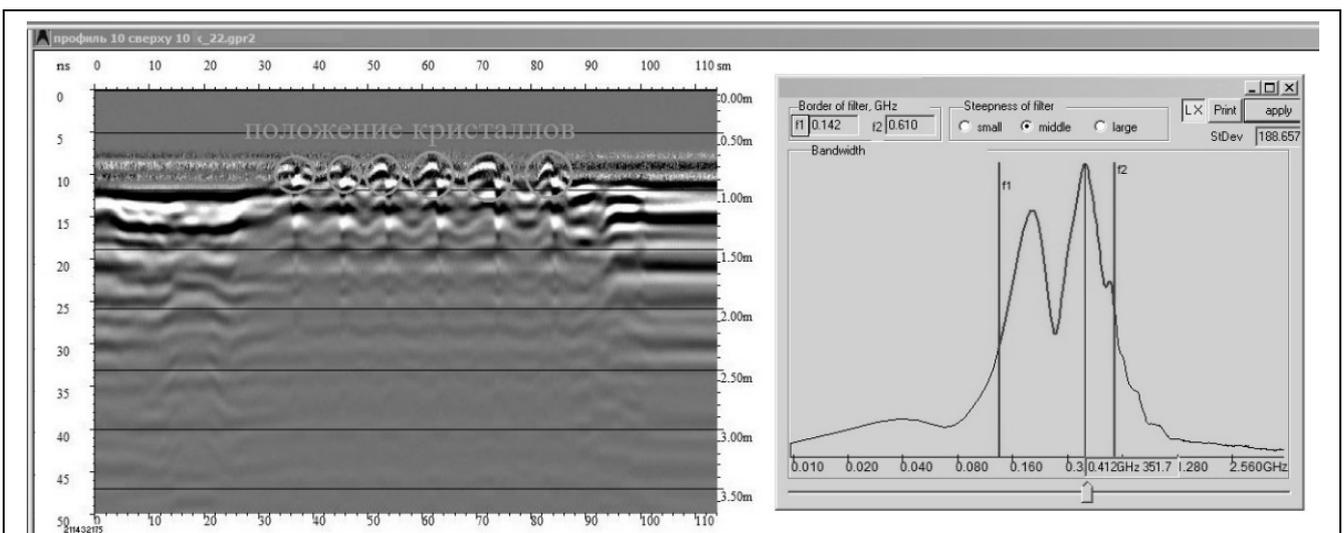


Рис. 5. Профиль георадиолокационного зондирования с уточненным положением кристаллов

Fig. 5. Profile of ground penetrating radar sounding with refined position of crystals

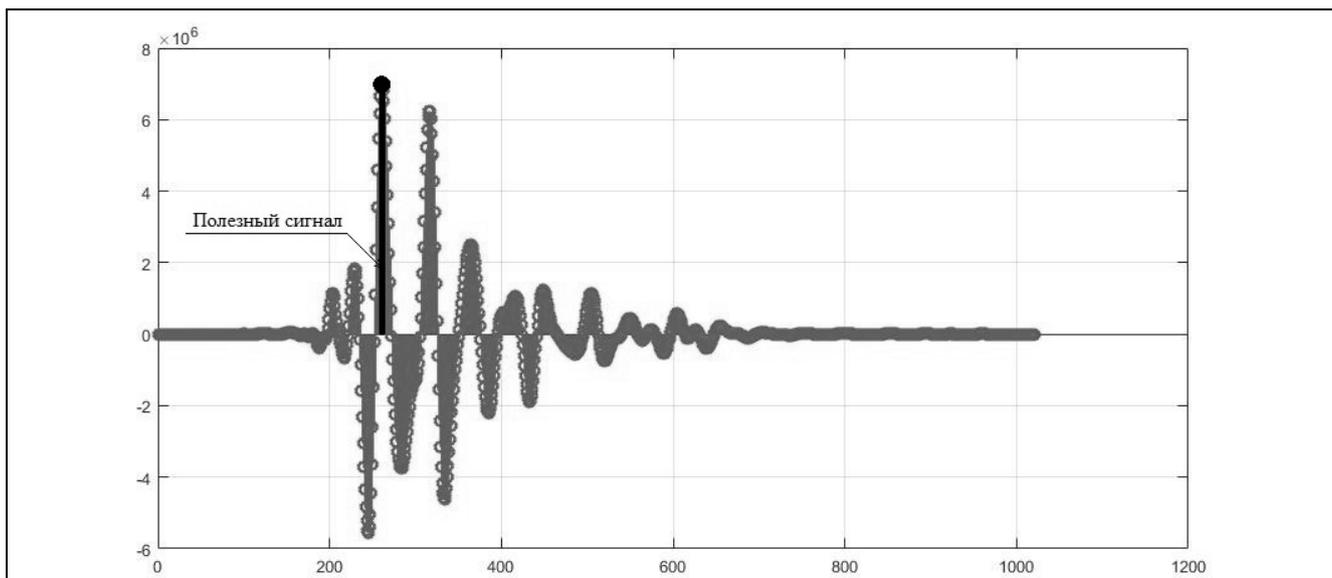


Рис. 6. Результат операции свертки трасс профилей (при действии фонового поля и без фонового поля), показывающий наличие полезного сигнала. По оси абсцисс указано количество отсчетов импульсов зондирующего сигнала, по оси ординат – амплитуда сигнала в относительных единицах

Fig. 6. The result of the profile trace convolution operation (with and without the background field), showing the presence of a useful signal (the abscissa axis shows the number of pulse counts of the probing signal, the ordinate axis shows the signal amplitude in relative units)

В каждом из наблюдаемых локальных объектов, отображающих положение кристаллов в модели, после операции свертки отчетливо картируется полезный сигнал на трассе. Подобная методика позволяет исключить ошибки оператора при проведении георадиолокационного зондирования и сэкономить время на интерпретацию полученных результатов.

Применяемое оборудование и модель горной породы

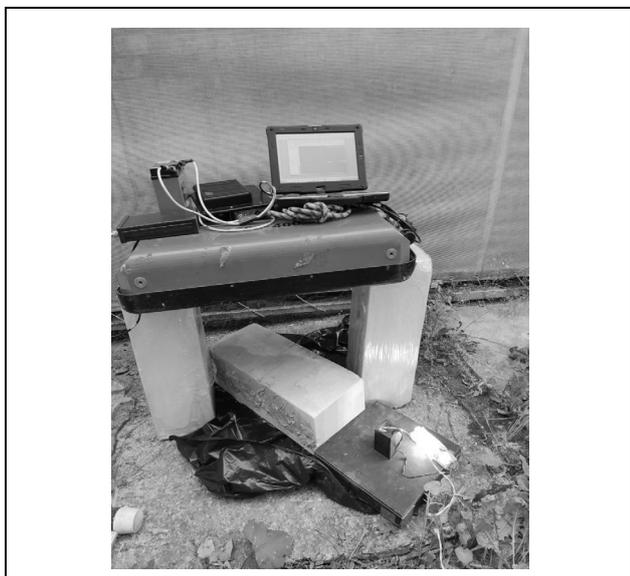


Рис. 7. Общий вид установки (сверху – георадар серии «ОКО-2», АБ-400, центральная частота 400 МГц, снизу – блок с кристаллами и источник фонового поля)

Fig. 7. General view of the installation (top – ground penetrating radar of the OKO-2 series, AB-400, central frequency 400 MHz, bottom – block with crystals and background field source)

Исследования проводились исходя из задачи определения положения кристаллов в модели горной породы. В качестве источника георадиолокационного излучения использовался георадар серии «ОКО-2» производства группы компаний «Логис-Геотех» АБ-400 (блок с центральной частотой 400 МГц). Общий вид установки представлен на рис. 7.

Объекты поиска – три кристалла берилла и три кристалла мориона различного размера, были вставлены внутрь специально высверленных отверстий в блоке газобетона (блок газобетонный Bonolit D500 600×200×200 мм) (рис. 8–10).



Рис. 8. Модель положения кристаллов в горной породе

Fig. 8. Model of the position of crystals in a rock



Рис. 9. Подготовка фиксации кристаллов в модели (кристаллы мориона)

Fig. 9. Preparation of crystal fixation in the model (moriion crystals)



Рис. 10. Подготовка фиксации кристаллов в модели (кристаллы берилла)

Fig. 10. Preparation of crystal fixation in the model (beryll crystals)

Наличие фонового электромагнитного поля повышает разрешающую способность за счет смещения спектра полезного сигнала в сторону высокочастотной составляющей, облегчая задачу выявления аномалий, связанных с локальными объектами [14]. В связи с этим появляется возможность сравнить запись отраженных сигналов без действия фонового поля и с включенным генератором фонового поля.

Заключение

При проведении георадиолокационного зондирования действие фонового поля облегчает поиск локальных объектов, однако особенности полученной волновой картины, в том числе характеристики участка проведения изысканий, строение верхней части разреза и действие ряда других факторов, не всегда позволяют получить объективную картину исследований. При помощи математической обработки полученных данных при проведении георадиолокационного зондирования по стандартной методике, а также при помощи действия фонового поля, можно провести операцию свёртки трасс (винеровская деконволюция). Благодаря рассмотренному методу появляется объективный критерий наличия полезного сигнала, облегчающий интерпретацию полученных данных.

Список источников

1. *Набатов В.В., Вознесенский А.С.* Георадиолокационное обнаружение полостей в заобделочном пространстве тоннелей метрополитенов // Горный журнал. 2015. № 2. С. 15–20. DOI 10.17580/gzh.2015.02.03.
2. *Чиж М.А.* Разработка методов обработки радиологических данных для неразрушающего контроля диэлектрических покрытий: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018. 146 с.
3. *Бардин Б.В.* Способ деконволюции спектрометрической информации и обнаружения спектральных пиков // Научное приборостроение. 2017. Т. 27. № 2. С. 75–82. DOI 10.18358/np-27-2-i7582.
4. *Вайнштейн Л.А.* Распространение импульсов // Успехи физических наук. 1976. Т. 118. № 2. С. 339–367. DOI 10.3367/UFN.0118.197602h.0339.
5. *Кюрегян А.С.* Пикосекундное переключение высоковольтных обратносмещенных р⁺-n⁺-структур в проводящее состояние при импульсном освещении // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 12. С. 1686–1692.
6. *Гудмен Дж.* Введение в Фурье-оптику / Пер. с англ. под ред. Г.И. Косоурова. М.: Мир. 1970. 182 с.
7. *Месяц Г.А., Насибов А.С., Кремнев В.В.* Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. М.: Энергия. 1970. 152 с.
8. *Sheen D.M., McMakin D.L., Hall T.E.* Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001. V. 49. № 9. P. 1581–1592. DOI 10.1109/22.942570.
9. *Soumekh M.* Bistatic synthetic aperture radar inversion with application in dynamic object imaging // IEEE Transactions on Signal Processing. 1991. V. 39. № 9. P. 2044–2055. DOI 10.1109/78.134436.
10. *Сличенко М.П.* Теоремы о представлении интеграла от периодической функции с финитным спектром Фурье в виде конечной суммы // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 5. С. 134–142. DOI 10.18127/j00338486-202305-00.
11. *Boyer A.L., Hirsch P.M., Jordan J.A., Lesem L.B., Van Rooy D.L.* Reconstruction of Ultrasonic Images by Backward Propagation // Acoustical Holography. 1971. V. 3. P. 333–348. DOI 10.1007/978-1-4615-8210-6_18.

12. Brandsberg-Dahl S., Chemingui N., Valenciano A., Ramos-Martinez J., Lingyun Q. FWI for model updates in large-contrast media // The Leading Edge. 2017. V. 36. № 1. P. 81–87. DOI 10.1190/tle36010081.1.
13. Ruths T., Zawila J., Fluckiger S.D., Miller N.J., Gibson R.G. New methodology merging seismic, geologic, and engineering data to predict completion performance // The Leading Edge. 2017. V. 36. № 3. P. 220–226. DOI 10.1190/tle36030220.1.
14. Патент на изобретение RUS2707419 от 28.02.2019. Способ георадиолокационного зондирования и устройство для его осуществления / Савватеев Я.В., Корнилов Б.Я.

Информация об авторах

Ярослав Викторович Савватеев – ведущий инженер

SPIN-код: не представлен

Сергей Васильевич Иляхин – д.т.н., профессор

SPIN-код: 6261-4101

Борис Анатольевич Корнилов – директор

SPIN-код: не представлен

Статья поступила в редакцию 25.04.2025

Одобрена после рецензирования 26.05.2025

Принята к публикации 02.06.2025

ЖУРНАЛ «РАДИОТЕХНИКА»

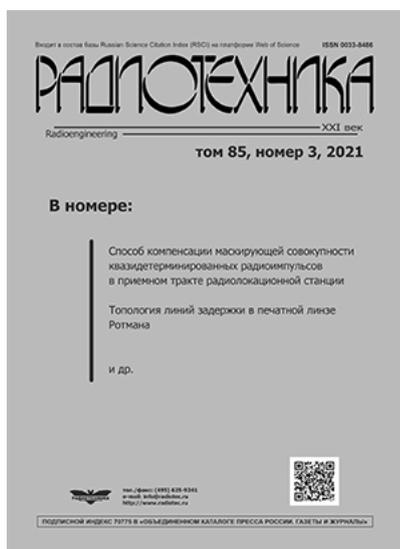
Главный редактор: академик РАН Юрий Васильевич Гуляев

Международный научно-технический журнал «Радиотехника» – один из старейших и известнейших научно-технических журналов России. Основное внимание журнала сосредоточено на ключевых проблемах, определяющих успех развития авангардных направлений радиотехники и электроники. В нем публикуются оригинальные статьи, технические решения и приводятся результаты новейших исследований во всех областях радиотехники и электроники: локация, навигация, связь, управление, радиопротиводействие, оптоэлектроника, акустоэлектроника и др. Включен в Перечень ВАК. Включен в состав базы Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science. Издается с 1937 г.

ISSN 0033-8486

Периодичность – 12 номеров в год

«Пресса России» – индекс 70775



Научные специальности ВАК

- 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики
- 1.3.4. Радиофизика
- 1.3.5. Физическая электроника
- 1.3.6. Оптика
- 1.3.7. Акустика
- 1.3.8. Физика конденсированного состояния
- 1.3.9. Физика плазмы
- 1.3.11. Физика полупроводников
- 1.3.12. Физика магнитных явлений
- 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки
- 1.3.19. Лазерная физика
- 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств
- 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 2.2.16. Радиолокация и радионавигация
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей
- 2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

Подписаться на журналы, выпускаемые Издательством Радиотехника (см. 4-ю сторону обложки), можно с любого месяца и на любой срок непосредственно в Издательстве.

Адрес Издательства:

101000, г. Москва, Подсосенский пер., д. 14, стр. 2

тел. +7(495)625-92-41

<http://www.radiotec.ru>, e-mail: info@radiotec.ru

Application of mathematical methods to determine the signal arrival under the influence of a background field (illumination field) in ground penetrating radar sounding

Ya.V. Savvateev¹, S.V. Ilyakhin², B.A. Kornilov³

¹ Institute of Physics of the Earth named after O.Yu. Schmidt (Moscow, Russia)

² Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze (Moscow, Russia)

³ Scientific and Technical Cooperative "Diogen" (Moscow, Russia)

¹ savvateev-yar@yandex.ru, ² isv11@mail.ru, ³ ntkdiogen48@mail.ru

Abstract

Under the influence of the background field during GPR sounding, the temporal resolution of the re-cording increases, which facilitates the search tasks. To determine the presence of anomalies associated with the presence of local objects, it is necessary to have an objective criterion for mapping search objects. One of the methods for solving such a problem is the Wiener deconvolution method, which consists in the operation of convolution of traces obtained under standard conditions of georadar-sensing, and obtained under the additional action of a background field (backlight field).

Keywords

Frequency spectrum, time spectrum, local objects, additive noise, convolution operation, Wiener deconvolution, direct Fourier transform, inverse Fourier transform

For citation

Savvateev Ya.V., Ilyakhin S.V., Kornilov B.A. Application of mathematical methods to determine the signal arrival under the influence of a background field (illumination field) in ground penetrating radar sounding. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2025. V. 30. № 3. P. 12–21. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202503-03> (in Russian)

References

1. Nabatov V.V., Voznesensky A.S. Georadar detection of voids at the soil-lining interface in subway tunnels. *Mining Journal*. 2015. № 2. P. 15–20. DOI 10.17580/gzh.2015.02.03. (in Russian)
2. Chizh M.A. Development of methods for processing radiographic data for non-destructive testing of dielectric coatings: dis. ... Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Moscow: Bauman Moscow State Technical University. 2018. 146 p. (in Russian)
3. Bardin B.V. Way deconvolution spectrometer information and detection of spectral peaks. *Scientific instrumentation*. 2017. V. 27. № 2. P. 75–82. DOI 10.18358/np-27-2-i7582. (in Russian)
4. Weinstein L.A. Propagation of impulses. *Successes of physical sciences*. 1976. V. 118. № 2. P. 339–367. DOI 10.3367/UFNr.0118.197602h.0339. (in Russian)
5. Kyuregyan A.S. Picosecond switching of high-voltage reverse-biased p+n-n+ structures to the conductive state by pulsed light. *Semiconductors*. 2014. V. 48. № 12. P. 1645–1652. (in Russian)
6. Goodman J. Introduction to Fourier Optics. Transl. from English. Ed. by G.I. Kosourov. Moscow: Mir. 1970. 182 p. (in Russian)
7. Mesyac G.A., Nasibov A.S., Kremnev V.V. Formation of nanosecond pulses of high voltage. Moscow: Energiya. 1970. 152 p. (in Russian)
8. Sheen D.M., McMakin D.L., Hall T.E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2001. V. 49. № 9. P. 1581–1592. DOI 10.1109/22.942570.
9. Soumekh M. Bistatic synthetic aperture radar inversion with application in dynamic object imaging. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1991. V. 39. № 9. P. 2044–2055. DOI 10.1109/78.134436.
10. Slichenko M.P. Theorems on the representation of the integral of a periodic function with finite Fourier spectrum as a finite sum. *Radiotekhnika*. 2023. V. 87. № 5. P. 134–142. DOI 10.18127/j00338486-202305-14. (In Russian)
11. Boyer A.L., Hirsch P.M., Jordan J.A., Lesem L.B., Van Rooy D.L. Reconstruction of Ultrasonic Images by Backward Propagation. *Acoustical Holography*. 1971. V. 3. P. 333–348. DOI 10.1007/978-1-4615-8210-6_18.
12. Brandsberg-Dahl S., Chemingui N., Valenciano A., Ramos-Martinez J., Lingyun Q. FWI for model updates in large-contrast media. *The Leading Edge*. 2017. V. 36. № 1. P. 81–87. DOI 10.1190/tle36010081.1.
13. Ruths T., Zawila J., Fluckiger S.D., Miller N.J., Gibson R.G. New methodology merging seismic, geologic, and engineering data to predict completion performance. *The Leading Edge*. 2017. V. 36. № 3. P. 220–226. DOI 10.1190/tle36030220.1.
14. Patent for invention RUS2707419 dated 28.02.2019. A method of georadiolocation sensing and a device for its implementation. Savvateev Ya.V., Kornilov B.Ya. (in Russian)

Information about the authors

Yaroslav V. Savvateev – Leading Engineer

Sergey V. Ilyakhin – Dr.Sc. (Eng.), Professor

Boris A. Kornilov – Director

The article was submitted 25.04.2025

Approved after reviewing 26.05.2025

Accepted for publication 02.06.2025