



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-21-28>

УДК 621.396.962.25

## МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ В ЛЧМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ОБНАРУЖИТЕЛЕ МАЛОЗАГЛУБЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

А. С. ЛОПАТЧЕНКО, И. Ю. МАЛЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(Минск, Республика Беларусь)*

**Аннотация.** Георадары с непрерывным линейно-частотно-модулированным зондирующим сигналом активно используются при обнаружении приповерхностных и малозаглубленных объектов. Специфика их функционирования связана с работой в ближней зоне в присутствии мощных мешающих отражений от границы укрывающей среды, которые маскируют отклик от объектов в ближних элементах разрешения и усложняют их обнаружение. В статье для решения этой проблемы предложен метод компенсации мешающих отражений от границы укрывающей поверхности в радиолокационном обнаружителе малозаглубленных объектов, использующем линейно-частотно-модулированный зондирующий сигнал. Приведены результаты экспериментальной апробации метода, позволяющего повысить характеристики георадаров с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением при обнаружении приповерхностных и малозаглубленных объектов.

**Ключевые слова:** георадар, линейно-частотно-модулированное излучение, радиолокационный обнаружитель, зондирующий сигнал, малозаглубленный объект.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Лопатченко, А. С. Метод компенсации мешающих отражений в ЛЧМ радиолокационном обнаружителе малозаглубленных объектов / А. С. Лопатченко, И. Ю. Малевич // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-21-28>.

## METHOD OF COMPENSATION OF INTERFERING REFLECTIONS IN A FMCW RADAR DETECTOR OF SHALLOW OBJECTS

ALEKSANDR LOPATCHENKO, IGOR MALEVICH

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

**Abstract.** Ground penetrating radars with a continuous frequency-modulated probing signal are widely used to detect near-surface and shallow objects. Their operation requires near-field operation in the presence of powerful interfering reflections from the boundary of the host medium, which mask the response from objects in nearby resolution elements and complicate their detection. To address this issue, this article proposes a method for compensating for interfering reflections from the boundary of the host surface in a radar detector of shallow objects using a frequency-modulated probing signal. The results of experimental testing of this method are presented, allowing for improved performance of ground penetrating radars with continuous frequency-modulated radiation in detecting near-surface and shallow objects.

**Keywords:** ground penetrating radar, linear frequency-modulated radiation, radar detector, probing signal, shallow object.

**Conflict of interests.** The authors declare that there is no conflict of interests.

**For citation.** Lopatchenko A., Malevich I. (2026) Method of Compensation of Interfering Reflections in a FMCW Radar Detector of Shallow Objects. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-21-28> (in Russian).

## Введение

Как известно, радиолокационное обнаружение подповерхностных объектов имеет давнюю историю. Идея «просвечивания» горных пород с помощью радара непрерывного зондирования была запатентована еще в далеком 1910 г. (патент DE 237 944). С того времени число систем и приложений неуклонно растет, что обусловлено высокой востребованностью георадаров (ГР) при оперативном поиске скрытно установленных объектов, проведении неразрушающего контроля дорожных покрытий и строительных конструкций.

В числе перспективных подходов, решающих задачу обнаружения приповерхностных и малозаглубленных объектов, особым образом выделяются ГР с непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) зондирующим сигналом (ЗС). Специфика функционирования таких радаров связана с работой в ближней зоне в присутствии мощной компоненты просачивающегося ЗС и значительного уровня мешающих отражений (МО) – эхосигналов (ЭС), отраженных от укрывающей поверхности (границы грунта, строительной конструкции, растительности и т. д.). Эти составляющие обычно маскируют отклик от малоразмерных приповерхностных и малозаглубленных объектов (далее – объектов интереса), расположенных вблизи укрывающей поверхности, уменьшая отношение сигнал/шум в элементе разрешения и усложняя обнаружение объектов. Для решения задачи снижения влияния МО на результаты обнаружения объектов интереса георадарами с ЛЧМ-сигналами в статье рассматривается разработанный авторами метод их компенсации.

## Физические основы метода

Работа ГР с ЛЧМ ЗС базируется на частотном методе измерения дальности [1–3], который заключается в определении компонент биений  $f_{Bi}$ , получаемых в результате перемножения опорного ЗС и принятых ЭС отражений от укрывающей поверхности, неоднородностей среды и объектов интереса [4]:

$$f_{Bi} = 2\Delta f(r_z + r_m \varepsilon^{1/2})/cT_p, \quad (1)$$

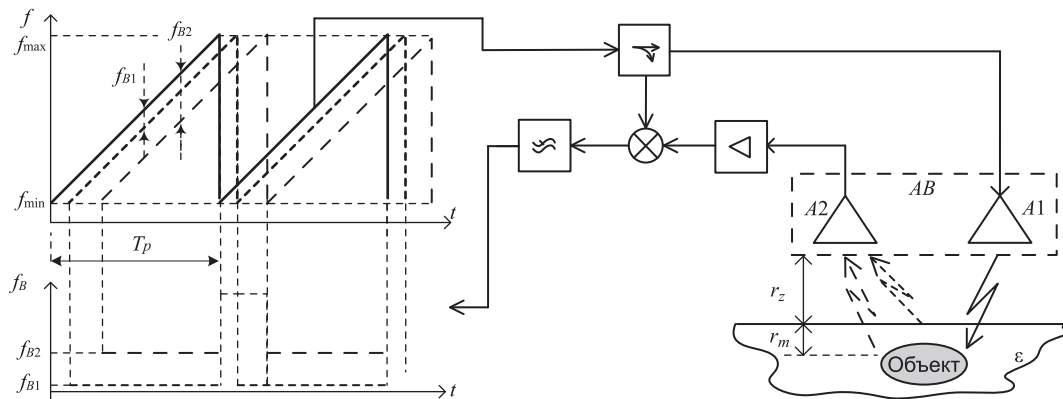
где  $\Delta f$  – диапазон перестройки по частоте (т. е. полная девиация частоты) генератора, управляемого напряжением,  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ ;  $T_p$  – время развертки по частоте;  $c$  – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость исследуемой среды;  $r_z$  – расстояние между антенным блоком (АБ) и поверхностью среды;  $r_m$  – расстояние между поверхностью среды и заглубленным объектом.

В подавляющем большинстве современных ГР с ЛЧМ ЗС используются бистатическая схема, гомодинное преобразование регистрируемых ЭС и цифровая обработка (рис. 1). В таких системах сверхширокополосный ЛЧМ ЗС подводится к передающей антенне  $A1$  (АБ) и одновременно через ответвитель подается на гетеродинный вход смесителя приемного канала. Эхосигналы регистрируются антенной  $A2$  и поступают на сигнальный вход смесителя, где перемножаются с отведенной частью ЗС. Фильтр нижних частот выделяет компоненты биений, частоты которых пропорциональны расстоянию до укрывающей поверхности и объекта интереса, а значит, их определение позволяет вычислить глубину его залегания.

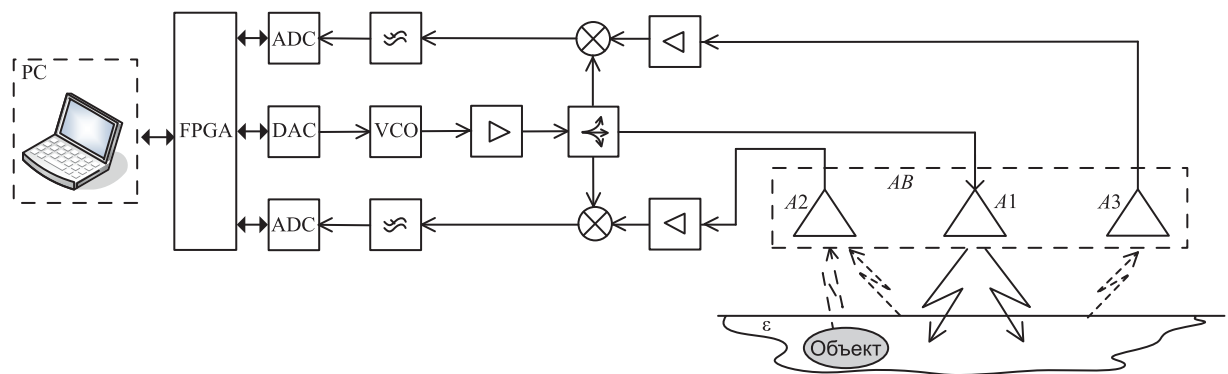
Спектр сигнала на выходе смесителя является глубинным портретом, т. е. профилем зависимости амплитуды ЭС от времени задержки, фактически визуализируя электродинамические характеристики разреза грунта под антенной радара. Спектральные составляющие, соответствующие границе укрывающей поверхности, в глубинном портрете имеют высокую энергетику и маскируют близко расположенный спектральный отклик от объекта интереса, ухудшая таким образом чувствительность и разрешающую способность системы. Поскольку объект и МО находятся в соседних элементах разрешения, а соответствующие им сигналы биений имеют сходную структуру, алгоритмические методы фильтрации малоэффективны.

При проведении поиска наибольший интерес представляет обнаружение объектов, не характерных для исследуемой среды, а значит, можно предположить, что их наличие редко. Если параметры среды равномерны в размерах, которые сопоставимы с АБ ГР, и изменяются монотонно, что обычно характерно для грунтов, в том числе с растительностью, и строительных конструкций (например, бетонных плит, стен и т. д.), то для подавления мощных отражений от поверхности зондируемой среды возможно включение в структуру ГР с ЛЧМ ЗС компенсационного кана-

ла, который обеспечит получение сигнала биений от укрывающей среды без объекта интереса (рис. 2).



**Рис. 1.** Иллюстрация принципа работы гомодинного георадара с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением  
**Fig. 1.** Illustration of the operating principle of a homodyne ground penetrating radar with continuous linear frequency-modulated radiation



**Рис. 2.** Функциональная схема гомодинного георадара ближнего действия с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением с компенсацией поверхностных отражений  
**Fig. 2.** Functional diagram of a short-range homodyne ground penetrating radar with continuous linear frequency-modulated radiation and compensation of surface reflections

В предложенной системе по командам, последовательно поступающим от компьютера (PC), цифро-аналоговым преобразователем (DAC), управляемым программируемой логической интегральной схемой (FPGA), формируется пилообразный модулирующий сигнал, который подается на генератор, управляемый напряжением (VCO). VCO выполняет формирование сверхширокополосного ЛЧМ ЗС. Особенностью данной структуры является наличие двух приемных каналов, на гетеродинные входы которых ответвляется часть ЗС. Фильтры нижних частот выделяют компоненты биений, которые преобразуются в цифровую форму аналого-цифровыми преобразователями (ADC) и после предварительной обработки в FPGA передаются в PC, выполняющий спектральное оценивание полученных реализаций сигналов с подавлением МО и отображение глубинных портретов в реальном масштабе времени.

Антенны в АБ выполняются одинаковыми. Передающая антенна А1 размещается в центре АБ, а приемные антенны основного (А2) и компенсационного (А3) каналов – симметрично с противоположных сторон относительно А1. Такая конструкция АБ обеспечивает пространственную развязку между каналами, возможность поиска объектов приемной антенной А2 и получение в процессе сканирования АБ оценки сигнала МО на выходе компенсационного канала.

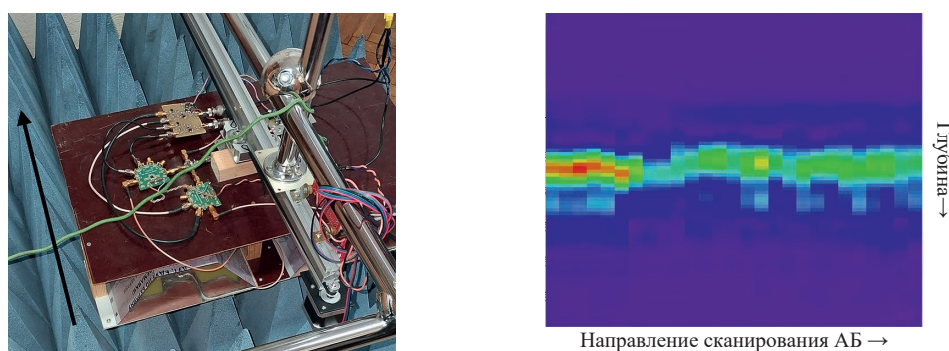
Компенсационный канал выполняется идентичным основному приемному каналу с высокой линейностью и широкополосностью, что минимизирует фазовые расхождения, а значит, и отличия в огибающей спектра между составляющими МО в основном и компенсационном приемных

каналов. Комплексные частотные характеристики основного и компенсационного приемных каналов должны быть практически идентичными.

Высокая корреляция между составляющими МО в приемных каналах и низкая энергетика составляющих, соответствующих полезному сигналу в основном канале, позволяют произвести компенсацию МО путем вычитания нормированного сигнала компенсационного канала из нормированного сигнала основного канала. При одинаковых свойствах среды под приемными антеннами такое вычитание снизит амплитуду МО, а появление объекта интереса только под одной из антенн декоррелирует сигналы в приемных каналах и обеспечит его обнаружение.

### Экспериментальная апробация метода

Экспериментальные исследования метода проводились на лабораторном стенде ГР с ЛЧМ ЗС (рис. 3, *a*), разработанном с учетом результатов, полученных в [4–6]. Стрелкой отмечено направление перемещения АБ по направляющей. Линия, соединяющая фазовые центры приемных антенн АБ, перпендикулярна направлению сканирования. Объект интереса в ходе экспериментов находился преимущественно под линией перемещения антенны основного приемного канала.



*a*

*b*

**Рис. 3.** Общий вид экспериментальной установки (*a*) и результат тестирования (*b*) измерительной площадки

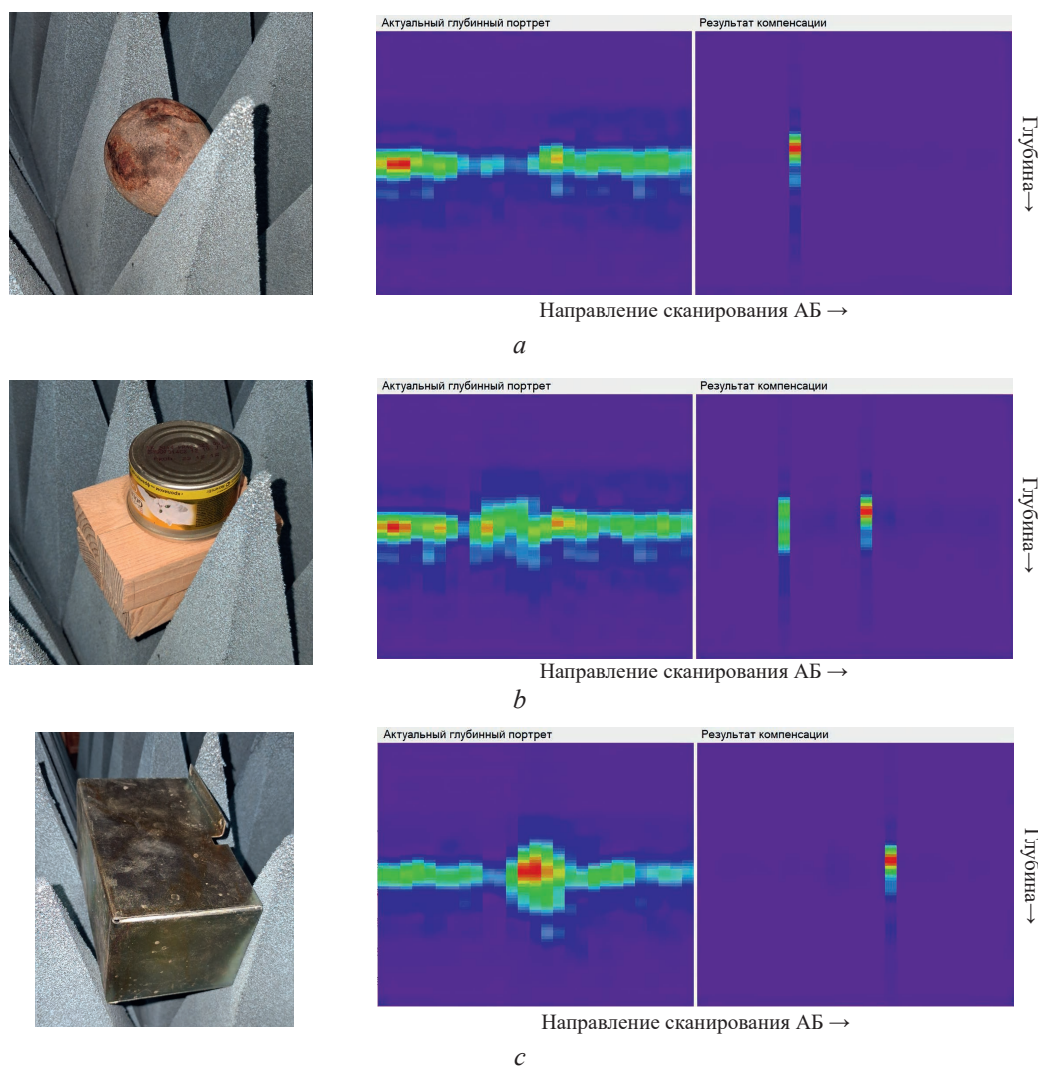
**Fig. 3.** General view of the experimental setup (*a*) and the test result (*b*) of the measuring platform

Реализованный гомодинный тракт ГР позволяет обрабатывать ЛЧМ-сигналы с базой 3000–8000, с выходной мощностью 10–12 дБм, коэффициентом шума 12–14 дБ и динамическим диапазоном не менее 70 дБ. Расхождение амплитудно-частотных характеристик основного и компенсационного приемных каналов в результате калибровки не превышало 0,5 дБ, расхождение фазо-частотных характеристик – 5°.

Измерительная площадка была организована в лаборатории с поверхностью в виде бетонных плит перекрытия ПТМ с пятью пустотами, поверх которых на битумную мастику выкладывался паркетный пол. Формирование радиолокационных изображений исследуемого участка осуществлялось в результате автоматического перемещения АБ вдоль направляющей. Перемещение АБ производилось перпендикулярно ПТМ.

На рис. 3, *b* представлен результат тестирования площадки для получения контрольного изображения в отсутствии объектов интереса. Для этого площадка укрывалась диэлектрическим радиопоглощающим материалом «ТОРА-39», выполненным в виде отдельных панелей (450×450 мм) пирамидального типа из эластичного пенополиуретана с углеродным наполнителем, который обеспечивает на частоте 1,5 ГГц коэффициент отражения при нормальном падении на рабочую поверхность (–35) дБ. На рис. 3, *b* виден протяженный через все изображение максимум ЭС на выходе тракта обработки, образованный комбинацией просачивающегося и отраженного от радиопоглотителя сигналов, под которым просматривается периодическая структура, соответствующая вершинам радиопоглотителя.

На рис. 4 представлены результаты экспериментов с малоразмерными (100–1000 см<sup>3</sup>) объектами интереса, размещенными в структуре радиопоглощающего материала «ТОРА-39». В столбцах на рис. 4 последовательно показаны общий вид, глубинный портрет в одноканальном режиме, изображение, полученное в результате выполнения компенсации.



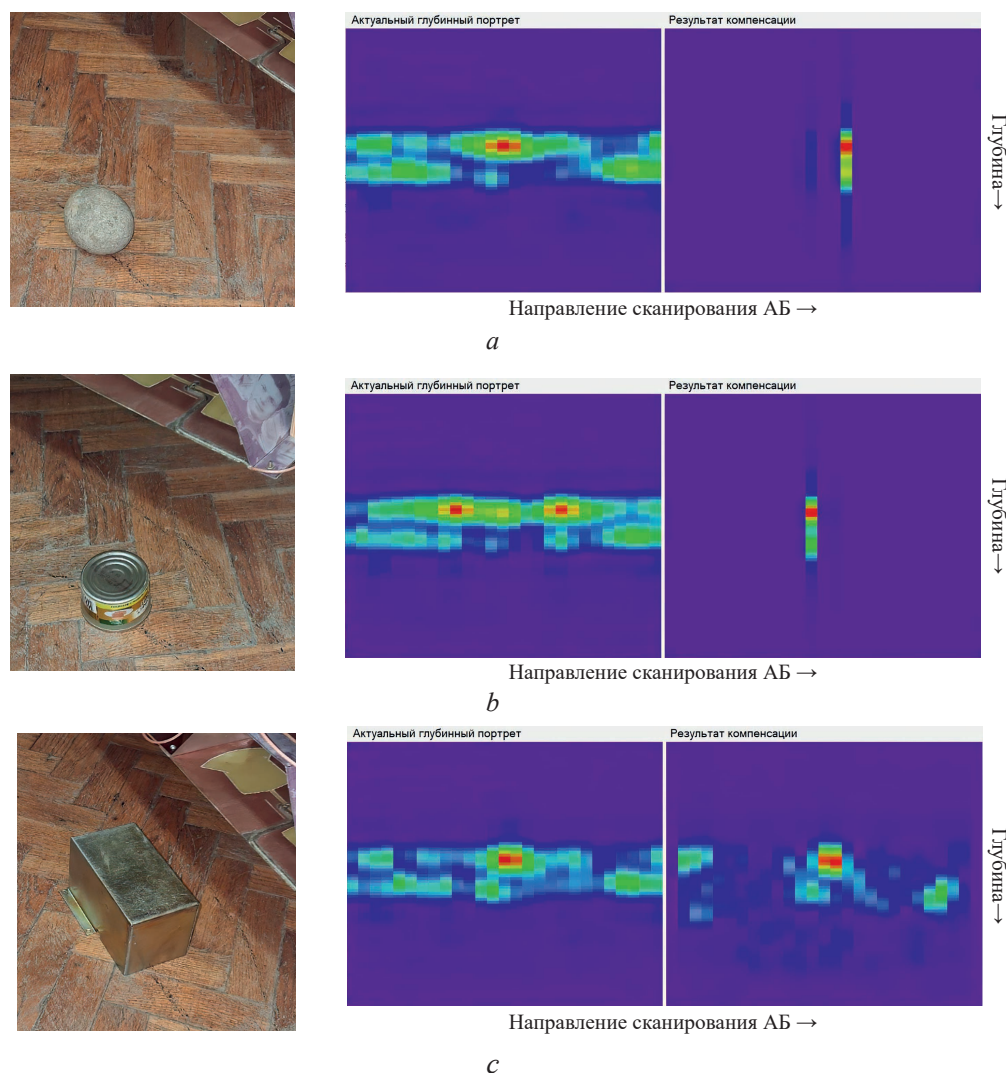
**Рис. 4.** Обнаружение типовых объектов интереса, расположенных в структуре «ТОРА-39»:  
*a* – гранитный камень; *b* – металлическая тонкостенная банка на деревянных брусках;  
*c* – металлическая толстостенная банка

**Fig. 4.** Detection of typical objects located in the “TORA-39” structure: *a* – granite stone;  
*b* – thin-walled metal can on wooden blocks; *c* – thick-walled metal can

Данный эксперимент моделирует нахождение объектов в приповерхностном однородном слое среды с небольшой плотностью и позволяет уменьшить влияние плотного бетонного пола на получаемое изображение. Видно, что объекты на рис. 4, *a*, *b* не выделяются на фоне среды, и только относительно большой металлический объект на рис. 4, *c* уверенно обнаруживается. Однако применение метода компенсации эффективно вычитает МО от радиопоглотителя, что позволяет надежно визуализировать объекты интереса, получив контрастную отметку протяженностью в один пиксель.

На рис. 5 показаны результаты обнаружения типовых объектов интереса, расположенных над подстилающей поверхностью в виде бетонной плиты перекрытия ПТМ.

При расположении объектов интереса на поверхности плотной среды в радиолокационном изображении различимы поверхностные отражения и периодическая структура перемычек ПТМ. В правой части изображения видно наличие отражений от стены. Наличие объектов интереса приводит к появлению контрастных максимумов в поверхностных отражениях, размазанных по направлению сканирования. Видно, что применение метода компенсации для малых объектов рис. 5, *a*, *b* эффективно вычитает МО и формирует контрастную отметку протяженностью в один пиксель. Для большего объекта (рис. 5, *c*) начинают просматриваться его контуры, а фон поверхностных отражений уменьшается, что делает изображение более контрастным.



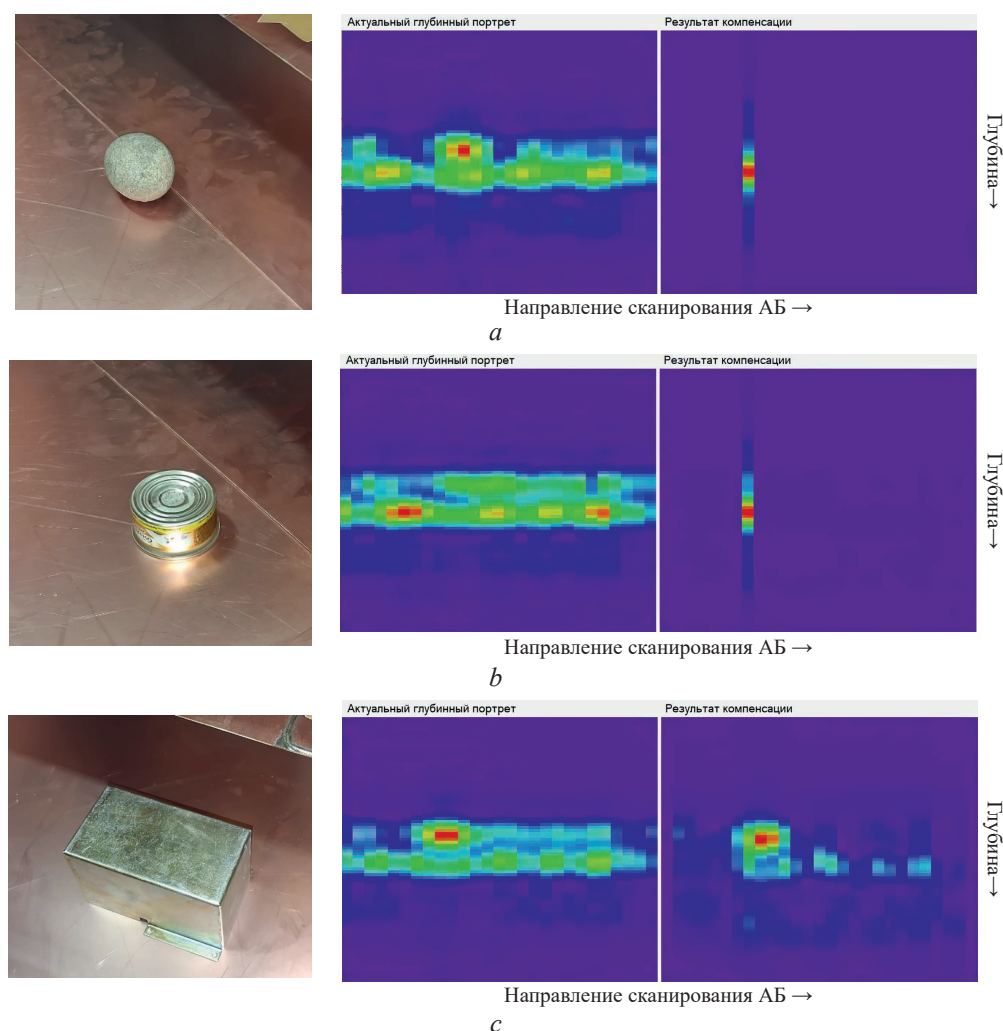
**Рис. 5.** Обнаружение типовых объектов, расположенных на бетонном полу с паркетом: *a* – гранитный камень; *b* – металлическая тонкостенная банка; *c* – металлическая толстостенная банка  
**Fig. 5.** Detection of typical objects located on a concrete floor with parquet: *a* – granite stone; *b* – thin-walled metal can; *c* – thick-walled metal can

На рис. 6 представлены результаты обнаружения объектов интереса, расположенных над поверхностью с высоким коэффициентом отражения (два положенных внахлест листа фольгированного стеклотекстолита FR4 размерами 80×50 см).

Плоская медная поверхность формирует ровный, контрастный локализованный слой на полученном изображении, наличие объектов интереса над которым хорошо заметно. Контуров объектов интереса размываются по направлению сканирования и для случая на рис. 6, *b* несколько искажаются. Метод компенсации в условиях мощных и равномерных отражений от поверхности с четкой границей показывает наилучшую эффективность, обеспечивая вычитание фона и формирование контрастных отметок от объектов интереса с правильной локализацией по перемещению АБ и с возможностью отображения контуров объектов интереса относительно большого размера (рис. 6, *c*). Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного метода компенсации МО от поверхности укрывающих и подстилающих сред в радиолокационном обнаружителе объектов интереса с непрерывным ЛЧМ ЗС.

Экспериментальные исследования показали, что применение метода компенсации делает отметки объектов интереса более контрастными на фоне МО и просачивающегося сигнала, что позволяет говорить об увеличении возможностей по их обнаружению. Также видно, что для объектов, сравнимых по размерам с шагом при сканировании (3 см), происходит уменьшение разме-

ров отметки по направлению сканирования АБ. Например, для случая на рис. 5, *a* можно говорить об уменьшении размера отметки с трех до одного пикселя, соответствующего шагу сканирования.



**Рис. 6.** Обнаружение типовых объектов, расположенных над поверхностью с высоким коэффициентом отражения: *a–c* – то же, что на рис. 5

**Fig. 6.** Detection of typical objects located above a highly reflective surface: *a–c* – the same as in Fig. 5

Недостатком метода компенсации является размножение отметок цели (рис. 4, *b* и рис. 5, *a*), а также их смещение от истинного положения, что связано со слабо поддающимися анализу особенностями распространения электромагнитного поля в ближней зоне антенн.

### Заклучение

1. Предложен метод компенсации мешающих отражений от границы укрывающей поверхности в радиолокационном обнаружителе приповерхностных и малоуглубленных объектов, использующем сверхширокополосный непрерывный линейно-частотно-модулированный зондирующий сигнал. Суть метода заключается в добавлении в структуру радара дополнительного приемного канала, идентичного основному. Антенны приемных каналов располагаются рядом перпендикулярно направлению сканирования. Высокая корреляция фона в приемных каналах при их идентичных комплексных частотных характеристиках позволяет осуществить компенсацию простым вычитанием. Нахождение разведываемого объекта преимущественно под одной из приемных антенн обеспечивает его уверенное обнаружение на фоне остатков мешающих отражений.

2. Проведенные исследования позволяют повысить характеристики георадаров с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением при обнаружении малоразмерных приповерхностных и малоуглубленных объектов.

### Список литературы

1. Золотарев, В. П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / В. П. Золотарев, В. А. Кутев, М. И. Финкельштейн. М.: Недра, 1986.
2. Комаров, И. В. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний / И. В. Комаров, С. М. Смольский. М.: Горячая линия – Телеком, 2010.
3. Коган, И. М. Близкая радиолокация / И. М. Коган. М.: Сов. радио, 1973.
4. Малевич, И. Ю. Экспериментальная оптимизация энергетических характеристик георадара с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением / И. Ю. Малевич, А. С. Лопатченко // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 48–55. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-48-55>.
5. Malevich, I. Yu. Self-Propelled Subsurface FMCW Radar Detector of Low-Depth Objects / I. Yu. Malevich, A. S. Lopatchenko, T. V. Shukevich // Proceedings of 5<sup>th</sup> Central Asian International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering CACSMGE 2022, 5–7 Oct., 2022, Samarkand, Uzbekistan. P. 88–90.
6. Малевич, И. Ю. Радиолокатор ближнего действия с непрерывным излучением для подповерхностного зондирования малоуглубленных объектов / И. Ю. Малевич, А. С. Лопатченко, Т. В. Шукевич // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: методы, технологии, проблемы и перспективы: сб. матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. Светлая Роща, 2025. С. 63–68.

Поступила 23.03.2026

Принята в печать 24.04.2026

### References

1. Zolotarev V. P., Kutev V. A., Finkelstein M. I. (1986) *Application of Radar Subsurface Sounding in Engineering Geology*. Moscow, Nedra Publ. (in Russian).
2. Komarov I. V., Smol'skiy S. M. (2010) *Fundamentals of the Theory of Radar Systems with Continuous Radiation of Frequency-Modulated Oscillations*. Moscow, Goryachaya Liniya – Telekom Publ. (in Russian).
3. Kogan I. M. (1973) *Short-Range Radar*. Moscow, Sovetskoe Radio Publ. (in Russian).
4. Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S. (2023) Experimental Optimization of the Energy Characteristics of a Ground Penetrating Radar with Continuous Linear-Frequency-Modulated Radiation. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 48–55. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-48-55> (in Russian).
5. Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S., Shukevich T. V. (2022,) Self-Propelled Subsurface FMCW Radar Detector of Low-Depth Objects. *Proceedings of 5<sup>th</sup> Central Asian International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering CACSMGE 2022. 5–7 Oct., Samarkand, Uzbekistan*. 88–90.
6. Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S., Shukevich T. V. (2025) Short-Range Continuous-Wave Radar for Subsurface Probing of Shallow Objects. *Emergency Prevention and Response: Methods, Technologies, Problems, and Prospects: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference*. Svetlaya Roshcha. 63–68 (in Russian).

Received: 23 March 2026

Accepted: 24 April 2026

### Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

### Сведения об авторах

**Лопатченко А. С.**, магистр техн. наук, ст. преп. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

**Малевич И. Ю.**, д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-96  
E-mail: a.lopatchenko@gmail.com  
Лопатченко Александр Сергеевич

### Information about the authors

**Lopatchenko A.**, M. Sci. (Tech.), Senior Lecturer at the Department of Information Radiotechnologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Malevich I.**, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-88-96  
E-mail: a.lopatchenko@gmail.com  
Lopatchenko Aleksandr