



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-48-55>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.396.962.25

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОРАДАРА С НЕПРЕРЫВНЫМ ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

И. Ю. МАЛЕВИЧ, А. С. ЛОПАТЧЕНКО

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

*Поступила в редакцию 09.12.2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** В последние годы активно проводятся исследования, направленные на развитие концепции построения и путей технической реализации георадаров с непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) излучением. Ключевыми предпосылками создания таких систем являются комплексный учет условий работы радиоканала в ближней зоне, включая особенности, связанные с многоканальным просачиванием компонент зондирующего сигнала в тракт приема, наличием многолучевых отражений от укрывающей поверхности, переменной скоростью электромагнитной волны, и обеспечение линейной обработки непрерывного группового широкополосного радиосигнала с большим динамическим диапазоном. Предложена и описана схема лабораторного стенда, предназначенного для исследования и оптимизации энергетических характеристик георадаров с непрерывным ЛЧМ-излучением в режимах с критическими уровнями отражений. Представлены результаты экспериментов по анализу и оптимизации параметров сквозной передаточной характеристики радиоканала. Выполнены исследования откликов для двух типов антенн на разных высотах подвеса. Проведена оценка реакции системы на увеличение длительности зондирующего импульса и изменение типа оконной функции. Установлена эмпирическая зависимость потерь сигнала при распространении в радиоканалах георадаров с непрерывным ЛЧМ-излучением. Выполненные исследования позволят усовершенствовать энергетические характеристики георадаров с непрерывным ЛЧМ-излучением, повысив эффективность обнаружения малоуглубленных и приповерхностных объектов.

**Ключевые слова:** георадар, непрерывный сигнал, линейно-частотно-модулированное излучение.

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

**Для цитирования.** 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>.

## EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF A GROUND PENETRATING RADAR WITH CONTINUOUS LINEAR-FREQUENCY-MODULATED RADIATION

IGOR YU. MALEVICH, ALEKSANDR S. LOPATCHENKO

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

*Submitted 09.12.2022*

**Abstract.** In recent years, research has been actively carried out aimed at developing the concept of construction and ways of technical implementation of ground penetrating radars with continuous wave linear-frequency-modulated (LFM) radiation. The key prerequisites for the creation of such systems are the complex consideration of the operating conditions of the radio channel in the near field, including the features associated with multi-

channel leakage of the probing signal components into the reception path, the presence of multipath reflections from the covering surface, the variable speed of the electromagnetic wave, and the provision of linear processing of a continuous group broadband radio signal with large dynamic range. The paper proposes and describes a scheme of a laboratory stand for LFM GPR research and optimization of the energy characteristics in modes with critical levels of reflections. The results of experiments on the analysis and optimization of the parameters of the end-to-end transfer characteristic of the radio channel are presented. Response studies were performed for two types of antennas at different suspension heights. The responses of the system to an increase in the duration of the probing pulse and a change in the type of window function were evaluated. An empirical dependence of signal losses during propagation in radio channels of LFM GPR has been established. The conducted studies will improve the energy characteristics of ground penetrating radars with continuous LFM radiation by increasing the detection efficiency of shallow and near-surface objects.

**Keywords:** ground penetrating radar, continuous signal, linear-frequency-modulated radiation.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** 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).

## Введение

В последние годы активно проводятся исследования, направленные на развитие концепции построения и путей технической реализации георадаров (ГР) с непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) излучением [1–4]. Ключевыми предпосылками создания таких ГР являются комплексный учет условий работы радиоканала в ближней зоне, включая особенности, связанные с многоканальным просачиванием компонент зондирующего сигнала (ЗС) в тракт приема, наличием многолучевых отражений от укрывающей поверхности, переменной скоростью электромагнитной волны, и обеспечение линейной обработки непрерывного группового широкополосного радиосигнала с большим динамическим диапазоном. Эти обстоятельства обуславливают актуальность экспериментального исследования и оптимизации энергетических характеристик ГР с ЛЧМ ЗС.

## Методика проведения эксперимента

Георадиолокационное зондирование с использованием непрерывного широкополосного ЛЧМ-сигнала основано на излучении, гомодинном приеме отраженных сигналов и оценке частот полученных компонент биений ( $f_{Bi}$ ), соответствующих отражающим объектам:

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

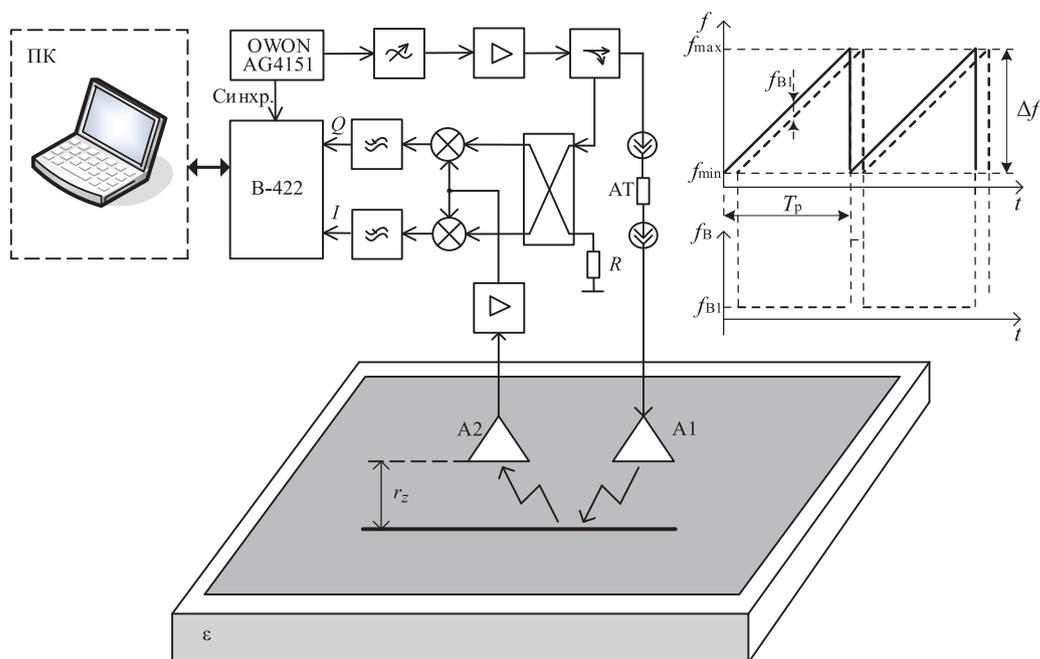
где  $\Delta f = (f_{\max} - f_{\min})$  – диапазон перестройки частот генератора, управляемого напряжением (ГУН);  $r_z$  – расстояние между антенной и поверхностью среды;  $r_m$  – расстояние между поверхностью среды и заглубленным объектом;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость исследуемой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

Разрешающая способность по глубине, обеспечиваемая классическими методами спектрального оценивания, для таких ГР описывается выражением

$$\Delta L = c/(2\Delta f \varepsilon^{1/2}). \quad (2)$$

Разрешение ГР по поверхности в ближней зоне фактически определяется размерами антенн, а для получения поверхностной проекции обнаруживаемого объекта при площадных исследованиях обычно выполняется продольное и поперечное сканирование антенного блока. При поиске приповерхностных и малоуглубленных объектов важно, наряду с хорошим пространственным разрешением и большим (не менее 60 дБ) динамическим диапазоном ЛЧМ ГР, обеспечить энергетический баланс сигналов в радиоканале даже при наличии высокого уровня отражений от укрывающей поверхности.

На рис. 1 представлена функциональная схема лабораторного стенда, предназначенного для исследования и оптимизации энергетических характеристик ГР с ЛЧМ ЗС в режимах с критическими уровнями отражений.



**Рис. 1.** Функциональная схема лабораторного стенда для исследования георадаров с линейно-частотно-модулированным зондирующим сигналом

**Fig. 1.** Function diagram of a laboratory stand for linear-frequency-modulated ground penetrating radars research

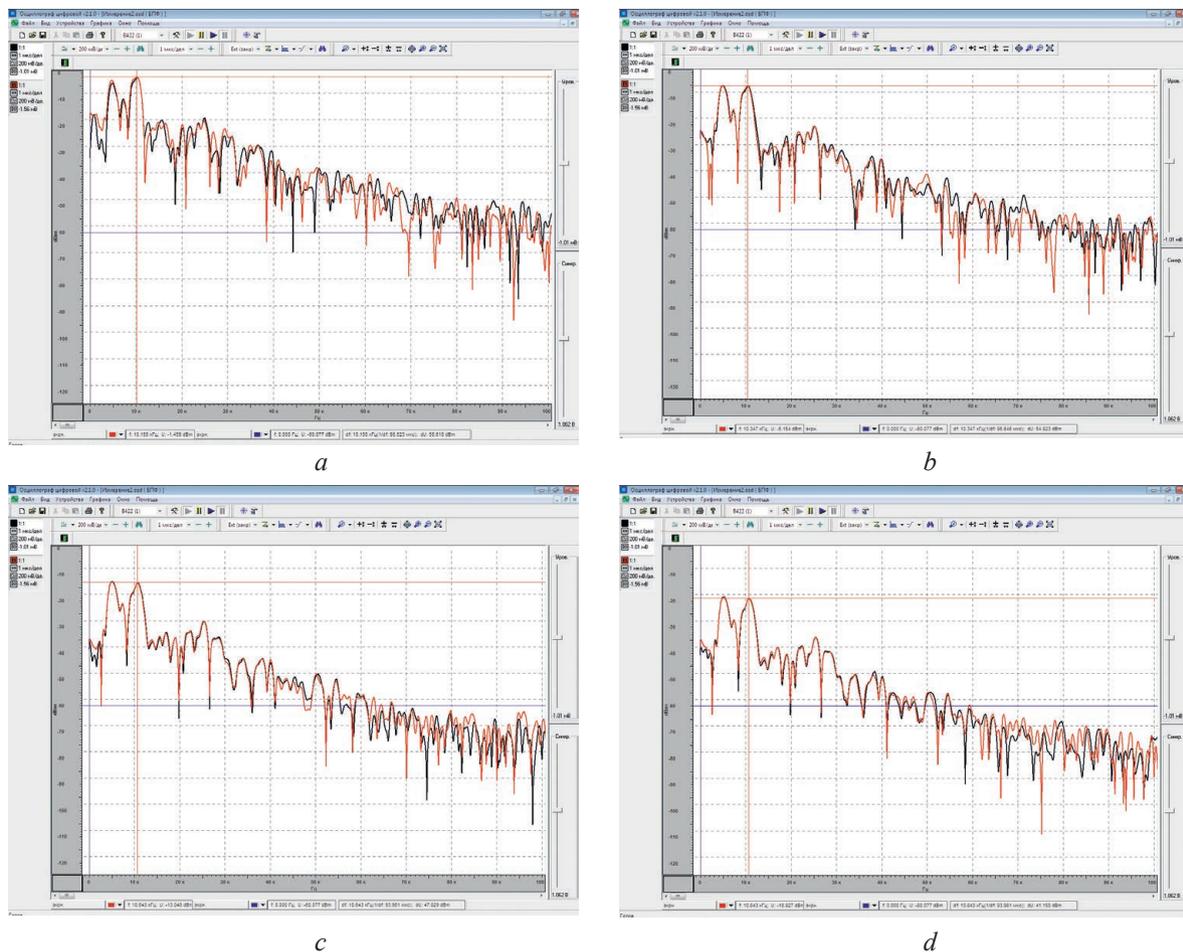
В качестве поверхности раздела сред использовался лист фольгированного стеклотекстолита FR4 размерами 125×110 см, расположенный на бетонной поверхности. Высота подвеса  $r_z$  антенного блока, состоящего из излучающей A1 и приемной A2 антенн, регулировалась в диапазоне 0,1–1,5 м.

ГР выполнен по бистатической схеме с гомодинной обработкой принимаемых сигналов в квадратурных каналах. Радиотракт ГР, разработанный с учетом результатов, приведенных в [1–4], позволяет формировать и обрабатывать ЛЧМ-сигналы в диапазоне 1000–2000 МГц, дискретно (с помощью диссипативных SMA аттенюаторов (АТ)) регулировать от плюс 22 до минус 4 дБм выходную мощность ЗС и апробировать различные типы антенн (A1 и A2). Коэффициент шума тракта не превышает 7 дБ, а значение динамического диапазона – не менее 70 дБ.

Генератор OWON AG4151 (рис. 1) формирует для ГУН модулирующий линейный пилообразный импульс с управляемыми длительностью, периодом, амплитудой и смещением. Синхровыход генератора в начале каждого периода пилообразного импульса формирует строб, синхронизирующий цифровой осциллограф В-422, что позволяет получать десятиразрядные реализации сигналов биений, привязанные во времени к формированию ЗС. Персональный компьютер ПК выполняет управление программным обеспечением осциллографа, при помощи которого производится предварительная обработка сигналов, в частности, наложение временных окон, дополнение сигнала нулями и вычисление энергетического спектра при помощи быстрого преобразования Фурье с выводом результатов на монитор в реальном времени и удобном для восприятия формате.

### Экспериментальная часть и обсуждение результатов

На первом этапе исследований энергетических характеристик ЛЧМ ГР выполняли эксперименты по анализу и оптимизации параметров сквозной передаточной характеристики радиоканала при полном отражении ЗС от листа фольгированного стеклотекстолита. На рис. 2 приведены результаты выходных спектрограмм ГР для различных затуханий АТ: 0, 10, 20 и 26 дБ. Первый высокий отклик на графиках соответствует отражению от раскрытия антенны A1, второй (маркированный) с амплитудными значениями соответственно –1,5 дБм; –5,2 дБм; –13,0 дБм и –18,9 дБм – от металлизированной поверхности. На спектрограммах рис. 2, а, б зафиксированы компрессия принятого сигнала и «перетекание» энергии из основного лепестка в соседние. Наблюдаются также искажения амплитудной структуры откликов с высокими частотами биений и уменьшение динамического диапазона выходного сигнала.



**Рис. 2.** Экспериментальная оптимизация сквозной передаточной характеристики радиоканала с линейно-частотно-модулированным георадаром

**Fig. 2.** Experimental optimization of the end-to-end transmission characteristics of radio channel with linear-frequency-modulated ground penetrating radar

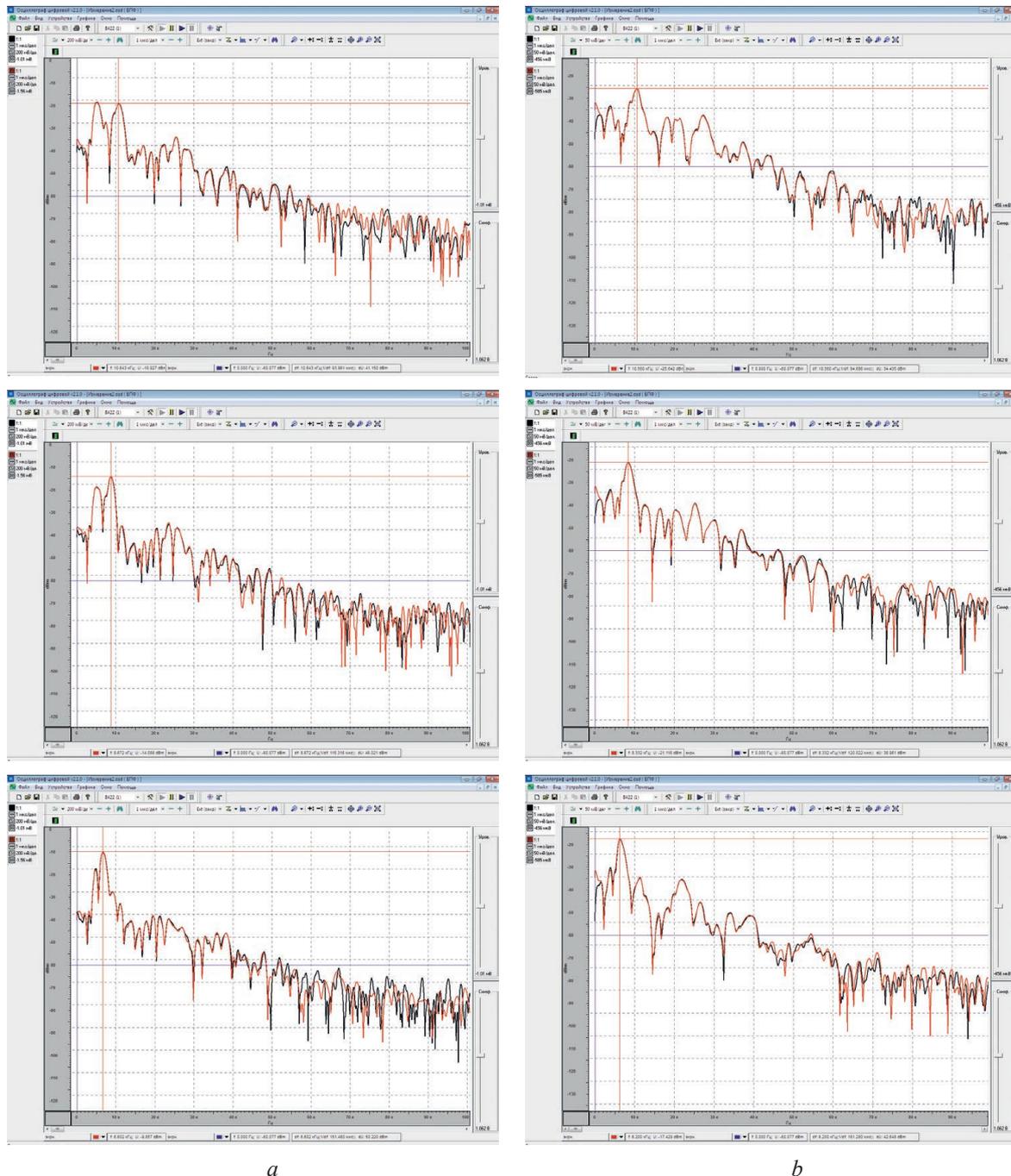
Спектрограммы на рис. 2, *c, d* показывают сходный характер полученных реализаций и пропорциональность реакций на вносимое АТ-затухание, что свидетельствует об отсутствии перегрузки радиоканала.

С учетом полученных характеристик ГР для проведения последующих экспериментов мощность ЗС устанавливалась на уровне  $-4$  дБм. На рис. 3 последовательно (сверху вниз) представлены результаты лабораторного тестирования ГР с различными высотами подвеса ( $r_z = 150; 100$  и  $50$  см) над металлизированной поверхностью антенного блока с рупорами (рис. 3, *a*) и блока из антенн типа «бабочка» (рис. 3, *b*) [5].

Анализ спектрограмм, полученных в ГР с рупорными антеннами (рис. 3, *a*) показывает высокую степень пространственной концентрации энергии в радиоканале, что гарантирует хорошее разрешение такого прибора по поверхности при площадных исследованиях. Однако в выходном спектре наблюдается мощный отклик, обусловленный отражением от раскрыва А1, который при приближении антенного блока к укрывающей поверхности может маскировать объекты поиска, расположенные в ближней зоне ГР.

Для антенн «бабочка» над металлизированной поверхностью (рис. 3, *b*) очевидно, что уровень выходного сигнала для всех высот подвеса в сравнении с рупорными антеннами меньше на  $7-8$  дБ, что практически соответствует разнице в коэффициентах усиления этих антенных блоков. Заметно также влияние расположения элементов лабораторной установки на результаты измерений при уменьшении высоты подвеса антенного блока. Однако отклик от металлической поверхности в таком ГР является доминирующим и хорошо спектрально структурирован, что позволяет надежно [2, 4] обнаруживать приповерхностные и малозаглубленные объекты.

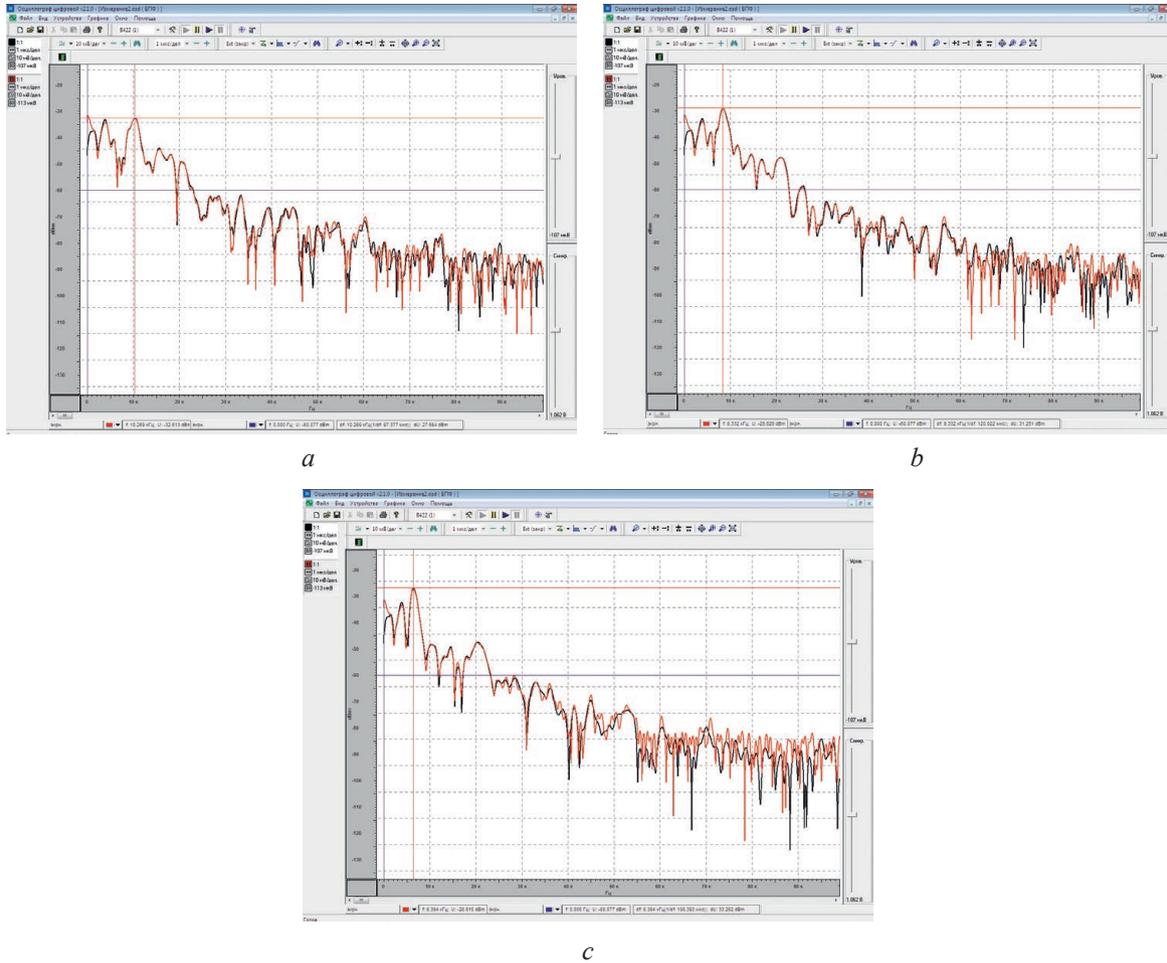
На рис. 4 представлены результаты лабораторного тестирования ГР с антеннами типа «бабочка» [5] для трех высот подвеса ( $r_z = 150; 100$  и  $50$  см) над бетонным основанием.



**Рис. 3.** Экспериментальные исследования откликов линейно-частотно-модулированных георадаров с регулируемой высотой подвеса антенн над металлизированной поверхностью  
**Fig. 3.** Experimental studies of linear-frequency-modulated ground penetrating radars with adjustable antenna suspension height on the metallized surface

Экспериментальные зависимости на рис. 4 показывают, что наряду с подобием амплитудной структуры спектрограмм, уровень отраженного от поверхности сигнала на 7–8 дБ меньше, чем в случае листа фольгированного стеклотекстолита (рис. 3, *b*). Также имеет место наличие увеличения глубины проникновения ЗС в среду зондирования, что фиксируется большим динамическим диапазоном амплитуд отклика в дальней зоне спектрограммы.

На рис. 5 представлены результаты вычислений потерь сигнала  $P_{\Pi}$  при распространении в радиоканале ЛЧМ ГР в зависимости от высоты подвеса блока антенн  $r_z$  для отражающих поверхностей из фольгированного стеклотекстолита и бетона.



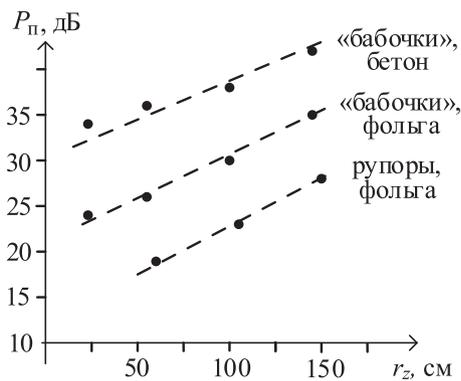
**Рис. 4.** Экспериментальные исследования откликов линейно-частотно-модулированных георадаров с регулируемой высотой подвеса антенн типа «бабочка» над бетонной поверхностью  $r_z$ , см:  
 $a - 150$ ;  $b - 100$ ;  $c - 50$

**Fig. 4.** Experimental studies of linear-frequency-modulated ground penetrating radars with adjustable height suspension of “butterfly” type antennas above the concrete surface  $r_z$ , cm:  
 $a - 150$ ;  $b - 100$ ;  $c - 50$

С достаточной для практики точностью потери сигнала  $P_n$ , дБ, при распространении в радиоканале ЛЧМ ГР могут быть аппроксимированы зависимостью

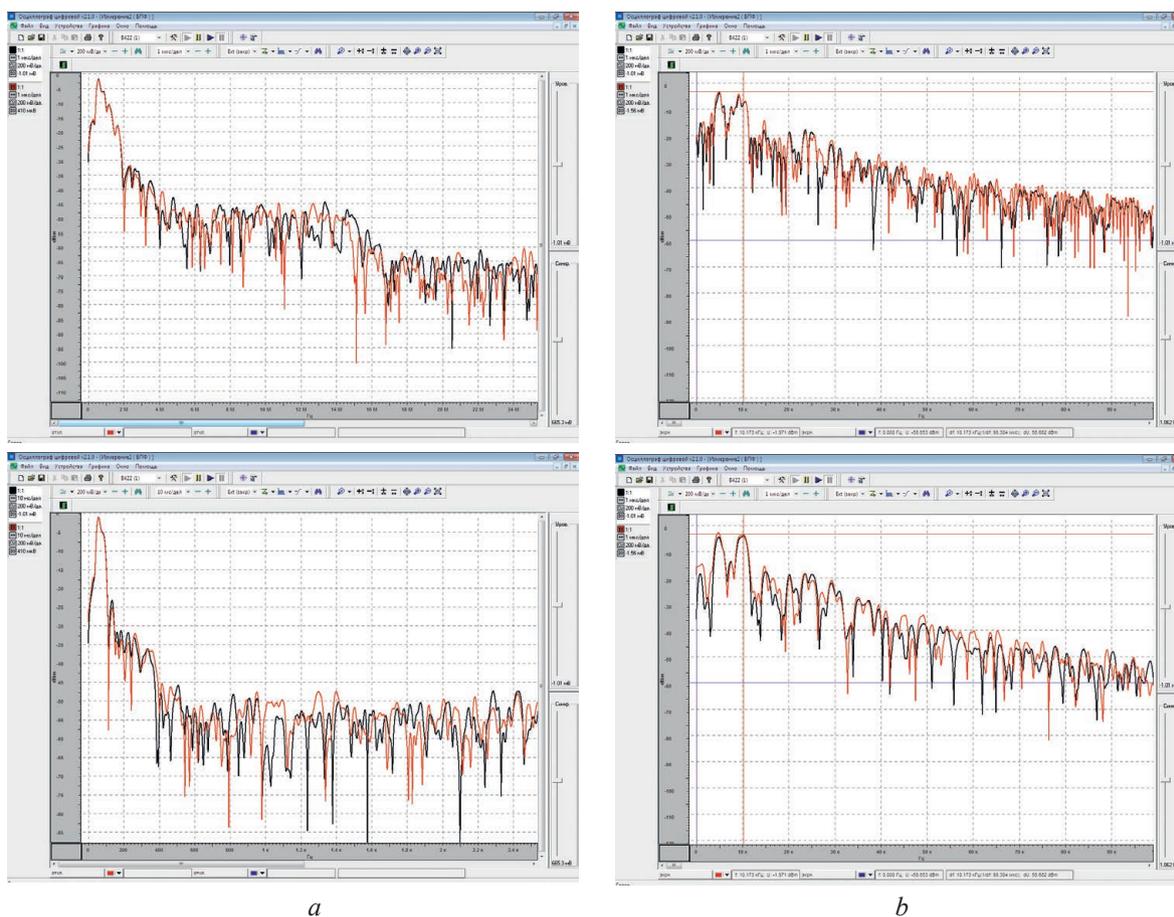
$$P_n \approx 0,1r_z + M_{pc} - G_{аб}, \quad (3)$$

где  $M_{pc}$  – эмпирический поправочный коэффициент, зависящий от типа поверхности раздела сред (для бетона  $M_{pc} \approx 28$  дБ, для металлических поверхностей  $M_{pc} \approx 20$  дБ);  $G_{аб}$  – коэффициент усиления антенного блока, дБ.



**Рис. 5.** Зависимость потерь сигнала при распространении в радиоканалах линейно-частотно-модулированных георадаров от высоты подвеса  
**Fig. 5.** Dependence of losses propagation in linear-frequency-modulated ground penetrating radars radio channels on the height of the suspension

На рис. 6 представлены результаты лабораторного тестирования ГР с антеннами типа «бабочка».



**Рис. 6.** Результаты тестирования линейно-частотно-модулированных георадаров:  
*a* – для длительностей линейного пилообразного импульса (сверху вниз)  $T_p = 10,24$  мкс и  $T_p = 102400,0$  мкс;  
*b* – с типами оконных функций (сверху вниз) – прямоугольным и Кайзера,  $\beta = 4$

**Fig. 6.** Linear-frequency-modulated ground penetrating radars test results:  
*a* – for durations of a linear sawtooth pulses (from top to bottom)  $T_p = 10.24 \mu\text{s}$  and  $T_p = 102400.0 \mu\text{s}$ ;  
*b* – with types of window functions (from top to bottom) – rectangular and Kaiser,  $\beta = 4$

Увеличение длительности модулирующего импульса с 10,24 мкс до 102400,0 мкс приводит к пропорциональному смещению составляющих компонент биений к началу координат. То есть ширина спектра отражений уменьшается, но без изменения разрешающей способности системы. На верхней спектрограмме рис. 6, *a* четко фиксируется область, выделяемая фильтрами нижних частот ГР, на нижней видно, что увеличение длительности  $T_p$  повышает энергию ЗС. Это позволяет улучшить отношение сигнал/шум и разделить влияние шумов тракта и шумов аналого-цифрового преобразователя. Изменение оконных функций (рис. 6, *b*) приводит к адекватным реакциям ЛЧМ ГР. Поэтому их подбор может быть выполнен на стадии настройки режимов работы ГР эмпирически, соблюдая компромисс между уровнем боковых лепестков спектрального преобразования и расширением главного лепестка.

## Выводы

1. Рассмотрены вопросы разработки и технической реализации лабораторного стенда для исследования и оптимизации энергетических характеристик георадаров с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением в режимах с критическими уровнями отражений.
2. Представлены результаты экспериментов по анализу и оптимизации параметров сквозной передаточной характеристики радиоканала. Выполнены исследования откликов для двух типов антенн на разных высотах подвеса. Проведена оценка реакций системы на увеличение длительности зондирующего импульса и изменение типа оконной функции. Установлена эмпирическая зависимость потерь сигнала при распространении в радиоканалах георадаров с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением.

3. Проведенные исследования позволят усовершенствовать энергетические характеристики георадаров с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением, повысив эффективность обнаружения малозаглубленных и приповерхностных объектов.

### Список литературы

1. Малевич, И. Ю. Самоходный подповерхностный радиолокационный обнаружитель малозаглубленных объектов / И. Ю. Малевич, А. С. Лопатченко, Т. В. Шукевич // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 5. С. 65–72. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-65-72>.
2. Малевич, И. Ю. Портативный ЛЧМ радар подповерхностного зондирования / И. Ю. Малевич, А. С. Лопатченко // Доклады БГУИР. 2019. Т. 119, № 1. С. 75–82.
3. Приемо-передающий тракт гомодинного типа с квадратурными каналами для ЛЧМ радара подповерхностного зондирования / И. Ю. Малевич [и др.] // Проблемы инфокоммуникаций. 2019. Т. 10, № 2. С. 12–17.
4. Лопатченко, А. С. ЛЧМ-радиолокатор подповерхностного зондирования с повышенной разрешающей способностью / А. С. Лопатченко, И. Ю. Малевич, С. А. Савенко // Доклады БГУИР. 2015. № 3. С. 43–48.
5. Экспериментальные исследования и обоснование типа антенны для радара подповерхностного зондирования с непрерывным излучением / С. А. Савенко [и др.] // Наука и военная безопасность. 2014. Т. 41, № 1. С. 14–18.

### References

1. Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S., Shukevich T. V. (2022) Self-Propelled Subsurface Radar Detector of Low-Depth Objects. *Doklady BGUIR*. 20 (5), 65–72. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-65-72> (in Russian).
2. Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S. (2019) Portable FMCW Ground Penetrating Radar. *Doklady BGUIR*. 119 (1), 75–82 (in Russian).
3. Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S., Shukevich T. V., Meledin K. I. (2019) Priyemo-Peredayushchiy Trakt Gomodinnogo Tipa s Kvadraturnymi Kanalami dlya LCHM Radara Podpoverkhnostnogo Zondirovaniya. *Problemy Infokommunikatsiy*. 10 (2), 12–17 (in Russian).
4. Lopatchenko A. S., Malevich I. Yu., Savenko S. A. (2015) LFM Ground Penetrating Radar with Increasing Resolution. *Doklady BGUIR*. (3), 43–48 (in Russian).
5. Savenko S. A., Malevich I. Yu., Bobkov Yu. Yu., Lopatchenko A. S. (2014) Eksperimental'nyye Issledovaniya i Obosnovaniye Tipa Antenny dlya Radara Podpoverkhnostnogo Zondirovaniya s Nepreryvnyim Izlucheniym. *Nauka i Voyennaya Bezopasnost*. 41 (1), 14–18 (in Russian).

### Вклад авторов / Authors' contribution

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

#### Сведения об авторах

**Малевич И. Ю.**, д. т. н., профессор, гл. н. с. научно-исследовательской лаборатории помехозащищенности радиотехнических устройств и систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Лопатченко А. С.**, магистр, ст. преп. кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-96  
E-mail: malevich@bsuir.by  
Малевич Игорь Юрьевич

#### Information about the authors

**Malevich I. Yu.**, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Principal Research Scientist at the Research Laboratory of Noise Protection of RF Devices and Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Lopatchenko A. S.**, M. of Sci., Senior Lecturer at the Information Radiotechnologies Department of the 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: malevich@bsuir.by  
Malevich Igor Yurievich