



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-65-72>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.962.25

САМОХОДНЫЙ ПОДПОВЕРХНОСТНЫЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ МАЛОЗАГЛУБЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

И.Ю. МАЛЕВИЧ, А.С. ЛОПАТЧЕНКО, Т.В. ШУКЕВИЧ

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

Поступила в редакцию 19 января 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Портативные, подвижные и мобильные подповерхностные радиолокационные обнаружители высоко востребованы для локализации неоднородностей и скрытых дефектов при мониторинге состояния дорожных покрытий, исследовании верхнего слоя земной поверхности при гуманитарном разминировании и выявлении схронов. Несмотря на наличие ряда специализированных устройств, проблема обеспечения надежного оперативного обнаружения приповерхностных и малоуглубленных объектов до конца не решена. Одно из перспективных направлений разработки подповерхностного радиолокационного обнаружителя с повышенной эффективностью обнаружения объектов при заглублении до $1,5 \dots 2 \lambda$ связано с использованием непрерывного сверхширокополосного линейно-частотно-модулированного зондирующего сигнала и оптимизацией конструктивного построения системы, обеспечивающего поддержание заданной высоты подъема антенного блока над исследуемой средой при его высокой мобильности. В статье приведены результаты разработки самоходного подповерхностного радиолокационного обнаружителя с непрерывным зондирующим сигналом, включающие обоснование технического облика прибора, разработку концепт-макета и результаты экспериментальных исследований. Прибор выполнен на четырехколесной автоматизированной платформе с регулируемой консолью, на которой перемещается антенный блок. При поступательном движении платформы выполняется последовательный радиолокационный обзор верхнего слоя грунта, результаты которого в виде поверхностной проекции нормированной мощности глубинных портретов выводятся на экран монитора. Проведенные натурные испытания прибора показали надежное обнаружение при- и подповерхностных объектов, выполненных из диэлектрических и металлических материалов.

Ключевые слова: подповерхностный радиолокационный обнаружитель малоуглубленных объектов, ЛЧМ радар подповерхностного зондирования, георадар.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Малевич И.Ю., Лопатченко А.С., Шукевич Т.В. Самоходный подповерхностный радиолокационный обнаружитель малоуглубленных объектов. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 65-72.

SELF-PROPELLED SUBSURFACE RADAR DETECTOR OF LOW-DEPTH OBJECTS

IGOR Yu. MALEVICH, ALEKSANDR S. LOPATCHENKO, TATIANA V. SHUKEVICH

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

Submitted 19 January 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. Portable, mobile and mobile subsurface radar detectors are in high needed for localizing inhomogeneities and hidden defects in monitoring the condition of road surfaces, studying the upper layer of the earth's surface during humanitarian demining and identifying caches. Despite the presence of a number of specialized devices, the problem of ensuring reliable operational detection of near-surface and shallow objects has not been fully resolved. One of the promising directions in the development of a subsurface radar detector with an increased efficiency of object detection when deepening up to $1,5 \dots 2 \lambda$ is associated with the use of a continuous ultra-wideband FMCW signal and optimization of the structural design of the system, which ensures the maintenance of a given height of rise of the antenna unit above the studied environment with its high mobility. The article presents the results of the development of a self-propelled subsurface radar detector with a continuous probing signal, including the substantiation of the technical appearance of the device, the development of a concept layout and the results of experimental studies. The device is made on a four-wheeled automated platform with an adjustable console on which the antenna unit moves. With the forward movement of the platform, a sequential radar survey of the upper soil layer is performed, the results of which in the form of a surface projection of the normalized power of depth portraits are displayed on the monitor screen. The conducted field tests of the device showed reliable detection of near- and subsurface objects made of dielectric and metallic materials.

Keywords: GPR, FMCW subsurface radar detector, ground radar detector.

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

For citation. Malevich I.Yu., Lopatchenko A.S., Shukevich T.V. Self-propelled Subsurface Radar Detector of Low-depth Objects. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 65-72.

Введение

Портативные, подвижные и мобильные подповерхностные радиолокационные обнаружители высоко востребованы для локализации неоднородностей и скрытых дефектов при мониторинге состояния дорожных покрытий, исследовании верхнего слоя земной поверхности при гуманитарном разминировании и выявлении схронов. Несмотря на наличие ряда специализированных устройств, проблема обеспечения надежного оперативного обнаружения приповерхностных и малозаглубленных объектов до конца не решена.

Одно из перспективных направлений разработки подповерхностного радиолокационного обнаружителя с повышенной эффективностью обнаружения объектов при заглублении до $1,5 \dots 2 \lambda$ связано с использованием непрерывного сверхширокополосного линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) зондирующего сигнала (ЗС) [1–5] и оптимизацией конструктивного построения системы, обеспечивающего поддержание заданной высоты подъема антенного блока (АБ) над исследуемой средой при его высокой мобильности.

Разработка облика самоходного подповерхностного радиолокационного обнаружителя

В соответствии с заявленными требованиями, подповерхностный радиолокационный обнаружитель может быть выполнен на автоматизированной платформе с консолью для АБ. Мобильность и устойчивость конструкции обеспечиваются четырехколесным шасси,

на платформе которого разместятся источник электропитания и аппаратура, реализующая метод частотной дальнометрии с использованием сверхширокополосного ЛЧМ ЗС.

Такой самоходный подповерхностный радиолокационный обнаружитель (СПРО) позволит реализовать механическое сканирование АБ по двум координатам – в поперечном направлении за счет перемещения по консоли, в продольном – в процессе передвижения самой платформы. При этом высота подъема АБ над поверхностью исследуемого участка грунта, определяемая условиями работы прибора, задается и регулируется положением консоли.

Обнаружение при- и подповерхностных объектов в СПРО основано на определении частотных компонент ($f_{\text{об}}$), соответствующих отражающим объектам, в спектрограмме эхо-сигнала, полученного в результате гомодинного преобразования в квадратурных каналах радиотракта. Блок оцифровки записывает реализации квадратурных компонент откликов ($I(t)$, $Q(t)$), выделенных фильтрами нижних частот, и передает их в спецвычислитель, выполняющий спектральное оценивание. На основании найденного спектрального портрета спецвычислитель в режиме реального времени выполняет алгоритмы обнаружения и распознавания заглубленного объекта (используя в качестве критерия значения толщины и протяженности) и передает данные в устройство индикации.

С учетом рассмотренных подходов и результатов работ [5–8] структурное решение СПРО принимает вид, показанный на рис. 1.

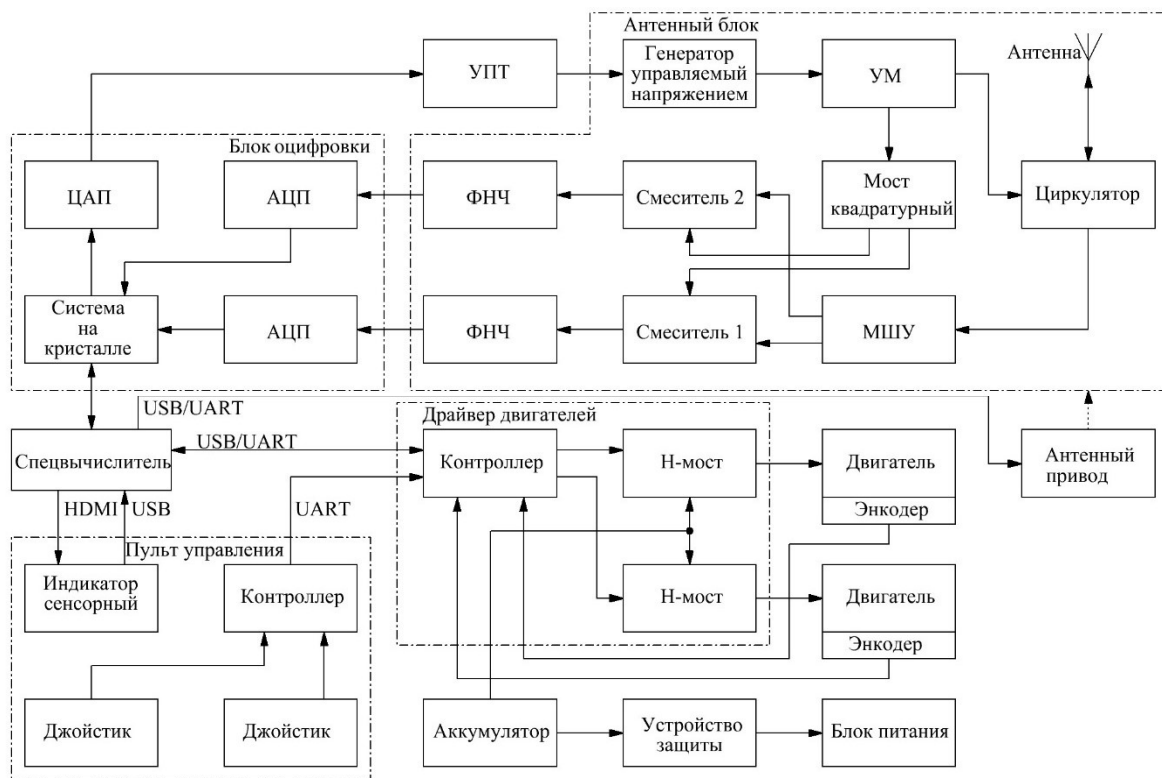


Рис. 1. Структурная схема СПРО

Fig. 1. Structure of SSRD

Конструктивное решение СПРО, разработанное в соответствии с рассмотренными принципами, с учетом автономности и необходимости обслуживания прибора одним оператором представлено на рис. 2.

СПРО выполняется в виде имеющей привод телеуправляемой автоматизированной платформы, на которой размещены исполнительные механизмы, оборудование и аккумулятор. Управление системой осуществляется с пульта дистанционного управления, имеющего индикатор с сенсорным экраном для отображения данных и изменения настроек системы. АБ с антенным приводом вынесены на консоль, а аппаратура СПРО и аккумулятор размещаются во внутренних отсеках прибора.

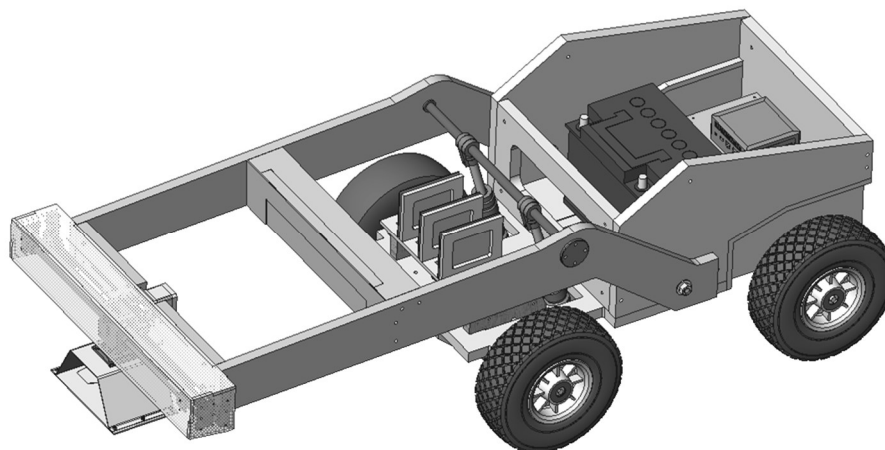


Рис. 2. Конструктивное решение СПРО
Fig. 2. SSRD design

Макет самоходного подповерхностного радиолокационного обнаружителя

Макет СПРО, реализованный в соответствии с проектным обликом, представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид макета СПРО
Fig. 3. General view of SSRD

Несущий корпус платформы и кронштейны консоли выполнены из пластика, что позволяет минимизировать переотражения ЗС, влияющие на работу СПРО. Консоль устанавливается над поверхностью грунта на фиксированных высотах 3, 10 либо 15 см и обеспечивает поперечное сканирование АБ.

Платформа приводится в движение мотор-редукторами постоянного тока, управление которыми осуществляется ШИМ-контроллером, связанным с джойстиком на пульте дистанционного управления. Плавность управления и поддержание стабильной скорости передвижения достигаются за счет организации обратной связи с энкодерами, установленными на осях двигателей.

Гомодинный радиотракт СПРО позволяет формировать и обрабатывать ЛЧМ сигналы с базой 3000...8000 в диапазоне 1000...2000 МГц, выходная мощность устройства составляет 25 мВт, коэффициент шума не превышает 7 дБ, динамический диапазон – не менее 80 дБ.

Блок оцифровки реализован на основе демонстрационной платы *STEMlab 125-14*, содержащей систему на кристалле *Xilinx Zynq 7010* и двухканальные 14-разрядные АЦП и ЦАП с тактовой частотой 125 МГц. Канал ЦАП используется для формирования линейного пилообразного импульса, который после масштабирования в усилителе постоянного тока (УПТ) модулирует СВЧ-сигнал генератора, управляемого напряжением. Синхронно с формированием модулирующего импульса два канала АЦП используются для записи комплексной реализации

сигнала ($I(t)$, $Q(t)$), получаемой на выходах квадратурных каналов в результате гомодинного преобразования принятых эхо-сигналов. Полученная реализация передается на спецвычислитель, где выполняются алгоритмы спектрального оценивания.

Спецвычислитель на основании коррелограммного метода спектрального оценивания производит первичную обработку измерительных данных. В случае обнаружения объекта по методу максимального правдоподобия [5, 7, 9] вычисляется уточненный глубинный портрет.

На рис. 4 представлены результаты инструментальных исследований чувствительности СПРО к неоднородностям среды при моделировании распространения сигнала в ВЧ-кабеле с использованием кабельных вставок и аттенюатора.

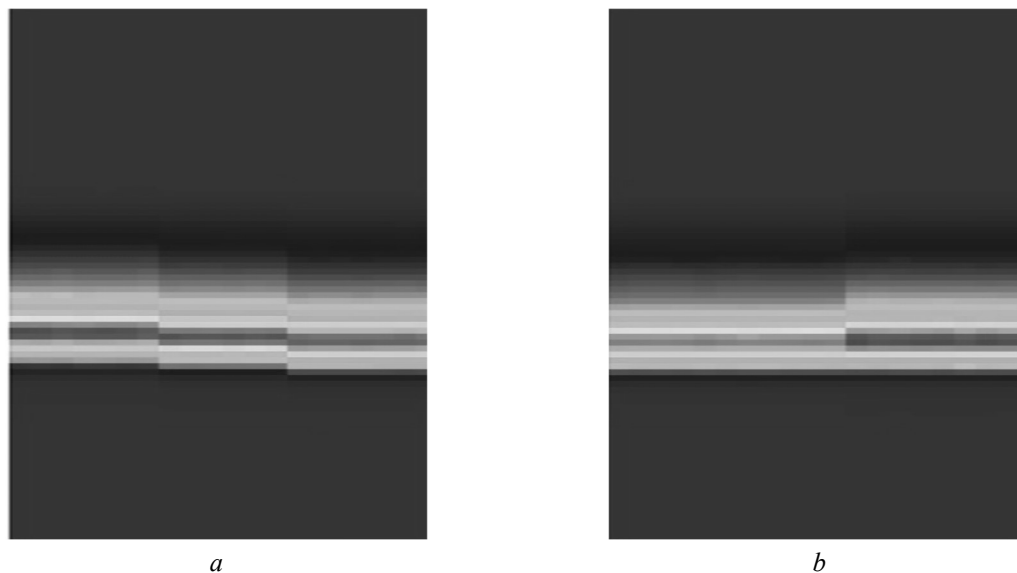


Рис.4. Визуализация тестовых сигналов на устройстве индикации СПРО: *a* – две кабельные вставки длиной 3 см; *b* – аттенюаторная вставка 10 дБ длиной 3 см

Fig. 4. Visualization of test signals on the display device SSRD: *a* – two cable inserts 3 cm long; *b* – 10 dB attenuator insert 3 cm long

Видно, что две кабельные вставки длиной по 3 см обеспечивают четкое (визуально регистрируемое) смещение пика спектральной составляющей, которое отображается на глубинном портрете, формируемом СПРО (рис. 4, *a*). Использование аттенюаторной вставки 10 дБ, наряду со смещением пика спектральной составляющей (рис. 4, *b*), приводит к его пропорциональному уменьшению.

При поступательном перемещении платформы с одновременным механическим сканированием в поперечной плоскости АБ, расположенного на консоли, выполняется последовательный радиолокационный обзор верхнего слоя грунта, результаты которого в виде проекции нормированной мощности глубинных портретов на горизонтальную плоскость с привязкой к перемещению СПРО выводятся на экран монитора (рис. 5, левый верхний квадрант).

В центральной части экрана отображается огибающая амплитудного спектра принятого эхо-сигнала, а в правой части – поле с результатами первичной обработки данных о глубинной структуре среды и поле с глубинным портретом объекта, полученным при вычитании сглаженной реализации сигнала, записанной при калибровке системы.

Полнофункциональный вид экрана индикатора СПРО показан на рис. 6 и содержит: изображение проекции мощности глубинных портретов на горизонтальную плоскость (рис. 6, *a*); осциллограммы квадратурных составляющих эхо-сигнала и его спектрограмму (рис. 6, *b, c*); пять полей (рис. 6, *d-h*) для отображения глубинной структуры среды в процессе сканирования АБ, соответственно результаты обработки данных коррелограммным методом, коррелограммным методом с взвешенным вычитанием помех, дублирование первых двух полей в логарифмическом масштабе и результат применения метода максимального правдоподобия.

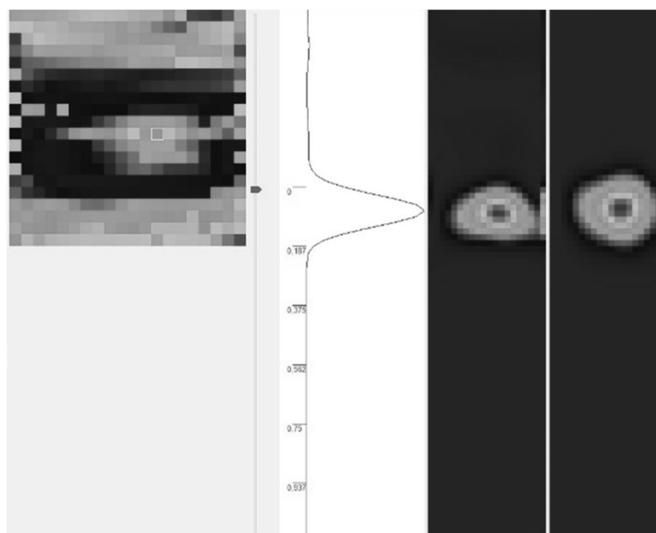


Рис. 5. Отображение приповерхностного диэлектрического объекта (камень) на экране СПРО
Fig. 5. Displaying a near-surface dielectric object (stone) on the SSRD screen

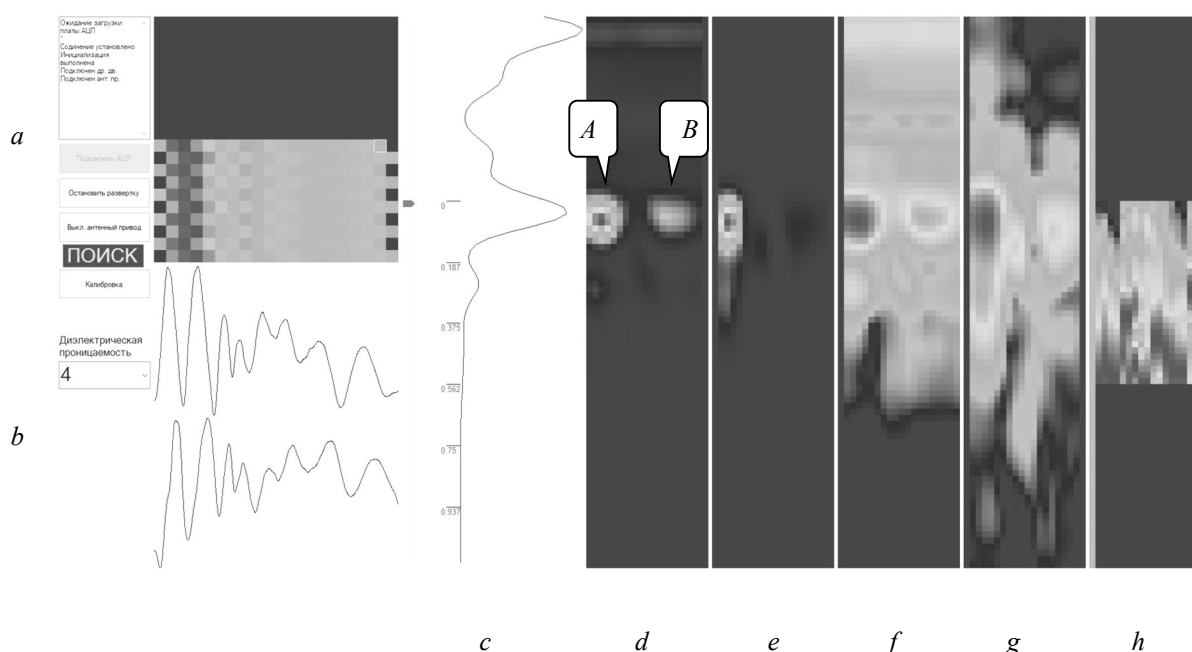


Рис. 6. Общий вид экрана индикатора СПРО в процессе обнаружения подповерхностного объекта
Fig. 6. General view of the SSRD indicator screen in the process of detecting a subsurface object

Здесь при стендовых испытаниях СПРО в качестве объектов обнаружения (*A, B*) использовались диэлектрические бруски размером $10 \times 8 \times 6,5$ см, выполненные из камня (*A*, $\epsilon_r = 5 \dots 7$) и дерева (*B*, $\epsilon_r = 2,5 \dots 3$), которые располагались на расстоянии 10 см от АБ в структуре панели широкодиапазонного поглотителя электромагнитных волн ТОРА-39.

На вертикальной линейке рис. 6, *d* хорошо видны радиолокационные изображения двух тестовых объектов (*A, B*), полученные в результате первичной обработки измерительных данных коррелограммным методом. Результаты вычитания фона (рис. 6, *e*) и отображение глубинных портретов в логарифмическом масштабе (рис. 6, *f, g*) позволяют детализировать структуру исследуемой среды.

На линейку рис. 6, *h* выведен уточненный глубинный портрет – результат применения метода максимального правдоподобия. Здесь в местах расположения тестовых объектов наблюдаются их четкие контуры.

Очевидна хорошая согласованность полученного радиолокационного изображения с физической структурой исследуемой среды и объектов.

Заключение

Приведены результаты разработки самоходного подповерхностного радиолокационного обнаружителя с непрерывным зондирующим сигналом, включающие обоснование технического облика прибора, разработку концепт-макета и результаты экспериментальных исследований.

Прибор позволяет бесконтактно, поддерживая фиксированную высоту подъема антенного блока над поверхностью, с высокой оперативностью и мобильностью выполнять площадные исследования глубинного портрета верхнего слоя земной поверхности при проведении мероприятий по мониторингу состояния дорожных покрытий, гуманитарному разминированию и выявлению скрытно установленных при- и подповерхностных объектов, выполненных из диэлектрических и металлических материалов.

Проведенные площадные испытания показали высокий потенциал прибора и возможности совершенствования отдельных подсистем.

Список литературы

1. *Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии.* Под ред. М.И. Филькенштейна. М.: Недра; 1986.
2. *Вопросы подповерхностной радиолокации.* Под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника; 2005.
3. Komarov I.V., Smolskiy S.M., Barton D.K. *Fundamentals of Short-Range FM Radar.* Horwood.: Artech House Publishers; 2003.
4. Daniels D.J. *Ground Penetrating Radar.* London: The Institution of Electrical Engineers; 2004.
5. Малевич И.Ю., Лопатченко А.С. Портативный ЛЧМ-радар подповерхностного зондирования. *Доклады БГУИР.* 2019;1(119):75-82.
6. Малевич И.Ю., Лопатченко А.С., Шукевич Т.В., Меледин К.И. Приемно-передающий тракт гомодинного типа с квадратурными каналами для ЛЧМ радара подповерхностного зондирования. *Проблемы инфокоммуникаций.* 2019;2(10):12-17.
7. Лопатченко А.С., Малевич И.Ю., Савенко С.А. ЛЧМ-радиолокатор подповерхностного зондирования с повышенной разрешающей способностью. *Доклады БГУИР.* 2015;3(89):43-48.
8. Бобков Ю.Ю., Малевич И.Ю., Лопатченко А.С., Шукевич Т.В. Антенна УВЧ диапазона для радара подповерхностного зондирования. *Материалы XXV Международной научно-технической конференции «Современные средства связи», Минск, 2020 г.* Минск; 2020:57-58.
9. Marple (Jr.) S.L. *Digital Spectral Analysis.* New York: Dover Publications, Inc.; 2019.

References

1. [Primeneniye radiolokatsionnogo podpoverkhnostnogo zondirovaniya v inzhenernoy geologii]. Pod red. M.I. Filkenshteyna. M.: Nedra; 1986. (In Russ)
2. [Voprosy podpoverkhnostnoy radiolokatsii]. Pod red. A.Yu. Grineva. M.: Radiotekhnika; 2005. (In Russ)
3. Komarov I.V., Smolskiy S.M., Barton D.K. *Fundamentals of Short-Range FM Radar.* Horwood.: Artech House Publishers; 2003.
4. Daniels D.J. *Ground Penetrating Radar.* London: The Institution of Electrical Engineers; 2004.
5. Malevich I.Yu., Lopatchenko A.S. [Portativnyy LCHM radar podpoverkhnostnogo zondirovaniya]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2019;1(119):75-82. (In Russ)
6. Malevich I.Yu., Lopatchenko A.S., Shukevich T.V., Meledin K.I. [Priyemo-peredayushchiy trakt gomodinnogo tipa s kvadraturnymi kanalami dlya LCHM radara podpoverkhnostnogo zondirovaniya]. *Problemy infokommunikatsiy.* 2019;2(10):12-17. (In Russ)
7. Lopatchenko A.S., Malevich I.Yu., Savenko S.A. [LCHM-radiolokator podpoverkhnostnogo zondirovaniya s povyshennoy razreshayushchey sposobnostyu]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2015;3(89):43-48. (In Russ)
8. Bobkov, Yu.Yu., Malevich, I.Yu., Lopatchenko, A.S., Shukevich, T.V. [Antenna UVCH diapazona dlya radara podpoverkhnostnogo zondirovaniya]. *Materialy XXV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sovremennyye sredstva svyazi", Minsk, 2020.* Minsk; 2020:57-58. (In Russ)
9. Marple (Jr.) S.L. *Digital Spectral Analysis.* New York: Dover Publications, Inc.; 2019.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Малевич И.Ю., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Помехозащищенность радиотехнических устройств и систем» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лопатченко А.С., ассистент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шукевич Т.В., заведующая научно-исследовательской лабораторией «Помехозащищенность радиотехнических устройств и систем» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Malevich I.Yu., Dr. of Sci., Professor, Principal Research Scientist of the Research Laboratory “Noise Protection of RF Devices and Systems” of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lopatchenko A.S., Assistant at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shukevich T.V., Head of the Research Laboratory “Noise Protection of RF Devices and Systems” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

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

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-88-96;
e-mail: malevich@bsuir.by
Malevich Igor Yur'evich