

УДК 621.396.962.25

ПОРТАТИВНЫЙ ЛЧМ РАДАР ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

И.Ю. МАЛЕВИЧ, А.С. ЛОПАТЧЕНКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 23 ноября 2018

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы проектирования портативного радара с широкополосным непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением для подповерхностного зондирования заглубленных объектов. Приводятся описание конструктивного построения и результаты лабораторных исследований разработанного устройства.

Ключевые слова: ЛЧМ радар подповерхностного зондирования, заглубленный объект, укрывающая среда.

Abstract. The results of the design of a portable FMCW ground penetrating radar is considered. The results of experimental studies of the device are presented.

Keywords: FMCW ground penetrating radar, subsurface objects, concealing surface.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 119, No. 1, pp. 75-82

Portable FMCW ground penetrating radar

I.Yu. Malevich, A.S. Lopatchenko

Введение

Высокая востребованность в радиоволновых средствах подповерхностного зондирования при поиске скрытно установленных объектов и проведении неразрушающего контроля строительных покрытий определяет актуальность задачи разработки новых конструкций. В числе перспективных средств, решающих задачу обнаружения заглубленных объектов, особым образом выделяются радары с широкополосным непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) излучением. Теоретическим и техническим аспектам разработки и функционирования радарных систем с ЛЧМ излучением посвящено большое число работ, из которых наиболее значимыми являются [1–5]. Вместе с этим при практической реализации портативных радаров с ЛЧМ излучением для подповерхностного зондирования возникает ряд актуальных вопросов, связанных с разработкой системного облика, технических и конструктивных решений, которые требуют углубленного рассмотрения.

Принцип функционирования ЛЧМ радара подповерхностного зондирования заглубленных объектов

Принцип функционирования ЛЧМ радара подповерхностного зондирования (РПЗ) поясним, используя рис. 1. Модулятор (МД) передающего модуля (ПдМ) РПЗ формирует пилообразный закон управляющего напряжения. Генератор, управляемый напряжением (ГУН), обеспечивает формирование зондирующего сигнала (ЗС) с частотой, соответствующей напряжению, изменяющемуся по линейному пилообразному закону, на его входе (рис. 1, б, сплошная линия). Сформированный сигнал подводится к передающей антенне (А1) антенного блока (АБ) и гетеродинному входу смесителя (СМ) приемного модуля (ПрМ) РПЗ.

Сигналы, отраженные от объектов (рис. 1, б, пунктирные линии), принимаются

антенной (А2) и поступают на сигнальный вход СМ приемного модуля, где перемножаются с опорной составляющей. В результате фильтром нижних частот (ФНЧ) выделяются частотные компоненты биений $f_{\delta i}$, которые регистрируются анализатором спектра (АС) и визуализируются устройством отображения (УО). Так как частоты биений пропорциональны расстоянию до поверхности и объекта в укрывающей среде, их определение позволяет вычислить глубину залегания объекта относительно поверхности.

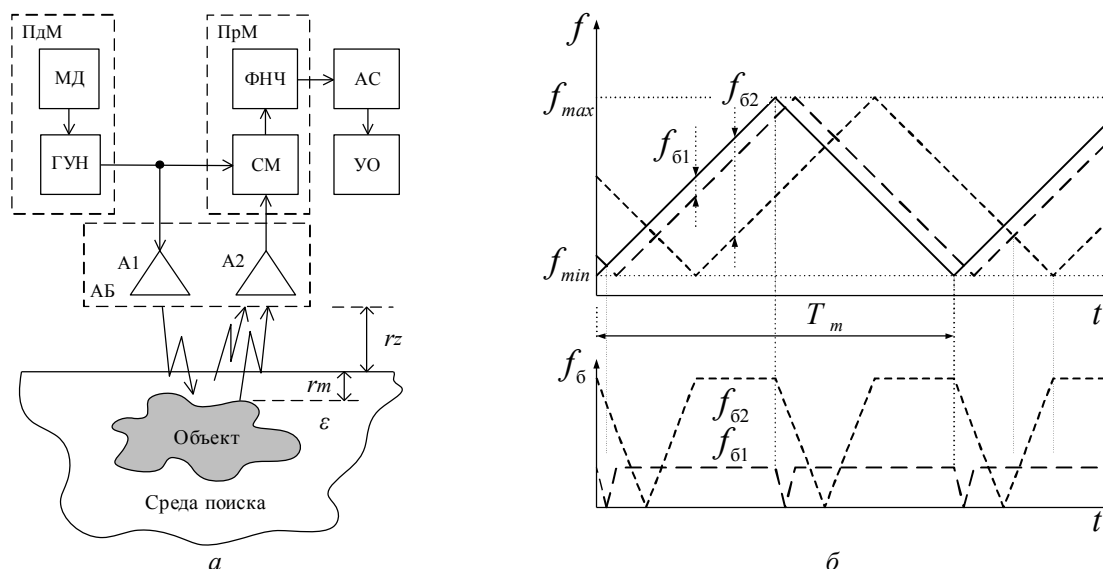


Рис. 1. Принцип функционирования ЛЧМ радара: *a* – структура; *б* – закон изменения частот

Расчетное значение разностной частоты (компоненты биений) в первом приближении определяется выражением

$$f_{\delta i} = \gamma \frac{2(r_z + r_m \sqrt{\varepsilon})}{c}, \quad (1)$$

где $\gamma = \Delta f / T_p$ – скорость перестройки частоты сигнала, формируемого ГУН; $\Delta f = (f_{\max} - f_{\min})$ – диапазон перестройки ГУН по частоте (полная девиация частоты); T_p – время развертки по частоте ($T_p = T_m / 2$ для вида модуляции типа симметричной пилы (как показано на рис. 1, б) и $T_p = T_m$ для несимметричного пилообразного закона модуляции); c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме; ε – диэлектрическая проницаемость исследуемой среды; r_z – высота подъема антенного модуля над поверхностью земли; r_m – глубина залегания наблюдаемого объекта.

Радиолокационный портрет \mathbf{P} вычисляется в соответствии с классическим коррелограммным методом спектрального оценивания [6, 7]:

$$\mathbf{P}_n = \left| \mathbf{S}_0 \langle n \rangle^T \mathbf{R} \mathbf{S}_0 \langle n \rangle \right|, \quad n = \overline{0, N_a - 1}, \quad (2)$$

где \mathbf{R} – корреляционная матрица, полученная для разностных частот при Фурье-преобразовании; N_a – число элементов сформированного глубинного портрета; \mathbf{S}_0 – матрица опорных частот.

Согласно частотному методу измерения дальности расстояние до объекта пропорционально частоте биений, поэтому разрешение по глубине, обеспечиваемое классическими методами спектрального оценивания, описывается выражением

$$\Delta L = \frac{\Delta f_{\Phi}}{2\gamma} \cdot \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (3)$$

где $\Delta f_{\Phi} \approx 1/T_n$ – спектральное разрешение метода [6]; T_n – время наблюдения; $\Delta f_{\Phi} / \gamma$ – время запаздывания сигнала, соответствующее спектральному разрешению.

Тогда для несимметричного пилообразного закона модуляции и минимально возможного времени наблюдения $T_n = T_m$ выражение (3) примет следующий вид:

$$\Delta L = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{T_n} \cdot \frac{T_m}{\Delta f} \cdot \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} = \frac{c}{2\Delta f \sqrt{\varepsilon}}. \quad (4)$$

Очевидно, в наихудшем случае разрешение метода спектрального оценивания не ниже потенциально возможного разрешения по дальности, обеспечиваемого параметрами зондирующего сигнала.

Для формирования поверхностной проекции обнаруживаемого объекта достаточно произвести продольное и поперечное перемещение АБ, поскольку в ближней зоне облучаемый участок представляет собой «пятно» круглой формы [10] радиусом $r_{rs} = r_s \tan(\Delta\theta/2)$ и площадью $S_s = \pi r_{rs}^2$, где r_s – высота подъема фазового центра антенны над границей укрывающей среды; $\Delta\theta = \sqrt{4\pi/G_r}$ – разрешающая способность по угловым координатам; G_r – коэффициент усиления приемной антенны.

Разработка системного облика портативного ЛЧМ РПЗ

Исходными данными для разработки РПЗ являются параметры ЗС, определяющие потенциально достижимые технические характеристики устройства. Принимая во внимание экспоненциальный рост затухания сигнала в твердых средах [5], нецелесообразно использовать частоты свыше 1800...2500 МГц. При этом для сухих песчаных пород в диапазоне 1500...1700 МГц затухание составляет 30...50 дБ/м, что с учетом расположения объектов на глубине до 40...50 см и специфики их радиолокационного наблюдения приводит к затуханию принимаемых сигналов (ПС) до 40...60 дБ.

Ширина спектра ЗС, определяемая требуемым разрешением РПЗ по глубине (обычно 2...3 см) в соответствии с (4) и с учетом (5...6)-кратного улучшения за счет применения методов адаптивного спектрального анализа [7], составляет 500...600 МГц. Таким образом, диапазон частот ЗС, формируемого ГУН, должен быть не менее 1100...1700 МГц. Однако из-за использования периодической модуляции в момент изменения закона модуляции (рис. 1, б) происходят скачки разностной частоты, что разрушает фазовые соотношения в корреляционной матрице и делает невозможным применение алгоритмов «сверхразрешения». Поэтому для практической реализации адаптивных алгоритмов «сверхразрешения» спектральный анализ необходимо производить на ограниченном одним линейным периодом модуляции участке реализации частоты биений. Это требует синхронизации работы ПдМ, ПрМ и блока оцифровки с целью получения реализации сигнала с выхода ПрМ, соответствующей линейному участку изменения частоты ЗС [8].

Модулятор в ПдМ, при данной технической реализации, является генератором импульса линейно изменяющегося напряжения. Из формулы (4) видно, что длительность модулирующего импульса T_m не влияет на потенциально достижимые значения разрешающей способности системы и определяет только скорость перестройки ГУН, которой пропорциональны частоты биений, соответствующие заглубленным объектам. Поэтому длительность модулирующего импульса фактически ограничивается требуемым сдвигом частот биений в частотной области:

$$T_m = \frac{L_n \Delta f}{f_{60} c}, \quad (5)$$

где f_{60} – требуемая минимальная частота биений, соответствующая прямому прохождению сигнала между антеннами; L_n – путь прямого прохождения сигнала, который включает длину соединительного кабеля от ПдМ к А1, расстояние между А1 и А2 и длину кабеля от А2 к ПрМ.

Выполняя контролируемое масштабирование частотной оси спектра ПС посредством выбора T_m , нетрудно переместить f_{60} в область, где реализуется эффективная линейная фильтрация помеховых составляющих. Например, если требуется обеспечить $f_{60} = 100$ кГц для ГУН с $\Delta f = 0,5...1$ ГГц при $L_n = 0,3$ м, то необходимо реализовать длительность

модулирующего импульса $T_m \approx 5...10$ мкс. При этом с учетом высоты подъема АБ над поверхностью среды на 0,15 м и длины соединительных кабелей 0,5 м (имеющих коэффициент укорочения 1,43) для объекта, расположенного на глубине 0,5 м в укрывающей среде с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 10$, значение частоты биений составит порядка 1,5 МГц. При выборе T_m важно также учесть условие кратности:

$$T_m = N/f_d, \quad (6)$$

где f_d – частота дискретизации, достаточная для оцифровки компоненты биений максимально возможной частоты, соответствующей объекту с максимальным заглублением; N – количество точек дискретизации, обеспечивающее получение глубинного портрета достаточного качества.

Практика обработки сигналов в ЛЧМ РПЗ показала, что достаточно качественная работа алгоритмов спектрального оценивания обеспечивается при $N = 256$. Тогда, с учетом (6) и принятой длительности зондирующего импульса $T_m = 10,24$ мкс, частота дискретизации должна составить 25 МГц, что достаточно для перекрытия требуемого диапазона глубин зондирования.

Мощность ЗС определяется требуемой глубиной обнаружения заглубленного объекта и отсутствием компрессии ПрМ, вызываемой ЗС, фронтально отраженными от зондируемой поверхности и просачивающимися из А1 в А2. Принимая во внимание максимальное затухание сигнала и реализуемую точку компрессии ПрМ в $-0...0$ дБм, подводимая к А1 мощность ЗС может составлять 10...200 мВт. При этом динамический диапазон ПрМ должен быть не менее 60...70 дБ. Тогда разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП) АС должна быть не ниже 12 (так как $ENOB = (70 - 1,76)/6,02 = 11,3 \approx 12$).

Решение задачи вычисления радиолокационного глубинного портрета обеспечивается спецвычислителем, получающим отсчеты разностной частоты с блока оцифровки и реализующим алгоритм (2). Глубинные портреты последовательно выводятся на индикатор, где формируется изображение «среза» среды поиска. На основании данной информации производится оценка однородности среды, и в случае присутствия достаточно крупных объектов интересующая область подвергается анализу алгоритмом получения сверхразрешения по методу максимального правдоподобия (ММП) [6, 7]:

$$MP_n = \left| \mathbf{S}o^{<n>T} \mathbf{Q} \overline{\mathbf{S}o^{<n>}} \right|^{-1}, \quad n = 0, N_a - 1, \quad (7)$$

где $\mathbf{Q} = \mathbf{R}^{-1}$ – обратная корреляционная матрица анализируемого сигнала.

При заранее найденных матрицах опорных частот вычислительную сложность коррелограммного метода (2) в основном определяет вычисление корреляционной матрицы анализируемого сигнала, которое можно оценить как $O(n^3)$, и ее перемножение на опорные векторы $O(n^2)$ для каждого вычисляемого частотного отсчета (где количество вычисляемых частотных отсчетов зависит от максимальной глубины обзора). Применение ММП (7) увеличивает вычислительные затраты как минимум вдвое за счет дополнительного нахождения обратной корреляционной матрицы $O(n^3)$. Поэтому приведенный выше подход, с применением ММП только к области предположительного наличия объекта, достаточно сильно снижает требования к производительности спецвычислителя.

С учетом рассмотренных принципов построения и системных параметров структура разрабатываемого портативного ЛЧМ РПЗ принимает вид, показанный на рис. 2.

РПЗ включает следующие подсистемы: радиолокационный блок, вычислитель, индикаторное устройство, источник питания и органы управления. Устройство управления задает режим работы РПЗ путем формирования с требуемым периодом синхроимпульсов запуска генератора пилообразного импульса и блока оцифровки, включающего АЦП, тактовый генератор, управляющий контроллер и буферное оперативное запоминающее устройство (ОЗУ). Данное решение позволяет задать временное положение окна анализа относительно момента начала генерации зондирующего импульса.

По приходу синхроимпульса генератор пилообразного импульса формирует один период линейно изменяющегося напряжения, являющегося модулирующим импульсом для ГУН. ГУН обеспечивает формирование широкополосного ЛЧМ сигнала, который после деления на опорную и зондирующую составляющие подводится к усилителю мощности,

обеспечивающего доведение ЗС до заданного уровня и подачу в антенный блок. Отраженный сигнал регистрируется приемной антенной АБ и поступает через малошумящий усилитель на сигнальный вход смесителя, где перемножается с опорным сигналом. ФНЧ выделяет область спектра, содержащую разностные частоты, соответствующие диапазону зондируемых глубин. Полученный сигнал биений оцифровывается АЦП (тактирование которого осуществляется высокостабильным генератором, обеспечивающим фиксированную длительность окна анализа), и в ОЗУ записывается заданное количество отсчетов его реализации.



Рис. 2. Структура РПЗ

После заполнения буфера памяти блок оцифровки передает полученную реализацию сигнала на спецвычислитель, где происходит ее цифровая обработка с целью вычисления глубинного портрета зондируемой среды.

Обнаружение объекта выполняется по глубинному портрету, вычисляемому по алгоритму (2) в режиме реального времени. При обнаружении объекта и уточнении его размеров по алгоритму (7), возможно произвести его классификацию, опираясь на полученные значения толщины и протяженности.

Аппаратно-программные и конструктивные решения для портативного ЛЧМ РПЗ

Одним из ключевых элементов РПЗ является АБ, который формирует требуемое распределение электромагнитного поля в зоне поиска и определяет разрешающую способность по проекции подповерхностного объекта. Основные требования к антеннам АБ портативного РПЗ обусловлены широкополосностью ЗС и ПС, работой в ближней зоне и необходимостью создания компактного устройства. В [9] приведены результаты сравнительного анализа характеристик ряда широкополосных антенн, на основании которых в разработанной конструкции АБ принято решение использовать две антенны типа «Бабочка» (рис. 3, а). Специфика работы таких антенн при подповерхностном радиолокационном зондировании рассмотрена в [10]. При реализации ПдМ и ПрМ РПЗ использованы результаты, полученные в [11], с учетом которых разработана функциональная схема, представленная на рис. 3, б. ПдМ и ПрМ выполнены с применением интегральных микросхем СВЧ диапазона и обеспечивают в диапазоне частот 1000...1700 МГц на 50-омной нагрузке с КСВН 1,4, соответственно, выходную мощность 20 дБм с неравномерностью не более ± 1 дБ, коэффициент шума не более 5 и динамический диапазон не менее 90 дБ.

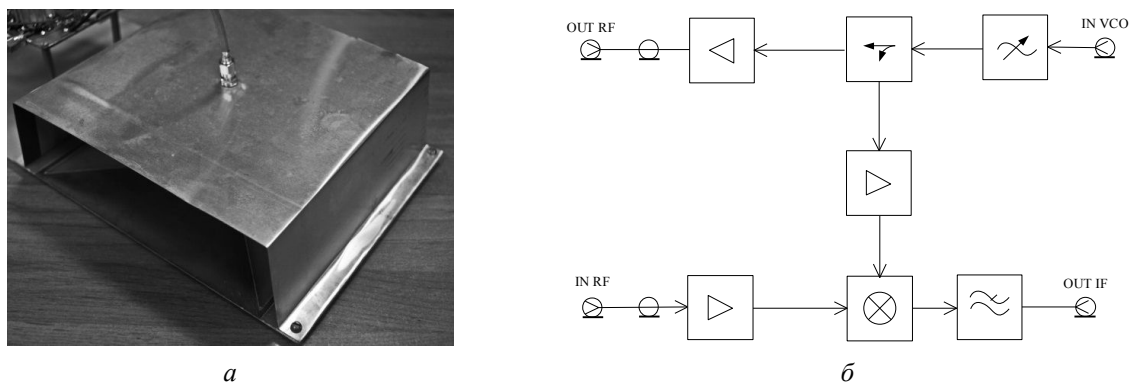


Рис. 3. Конструктивные особенности радиомодуля: *а* – общий вид АБ; *б* – функциональная схема

Программное обеспечение представляет собой комплекс оригинальных вычислительных процедур, реализующих приведенные выше методы спектрального оценивания, и выполняет следующий алгоритм: получение реализации частоты биений; вычисление глубинного портрета согласно (2); нормировка и компенсация математического ожидания реализации сигнала; перерасчет глубинного портрета согласно (2) и его вывод на индикатор. После заполнения индикатора последовательно выводимыми глубинными портретами запускается алгоритм поиска и распознавания объекта: в полученном ранее срезе среды находится максимум спектральной плотности мощности (СПМ); исходя из заданной вероятности ложной тревоги определяются границы объекта; согласно (7), производится спектральная оценка найденной области; определяется средняя толщина объекта; принимается решение о принадлежности объекта к одному из классов.

Вычислительная платформа, выполненная на Intel NUC7i3, обладает низким энергопотреблением и достаточной производительностью для расчетов в реальном масштабе времени глубинных портретов согласно (2). Время распознавания объекта в значительной степени зависит от анализируемой области и в среднем составляет 3...10 с.

Конструктивное решение РПЗ разработано в соответствии с рассмотренными принципами функционирования с учетом портативности, автономности и необходимости обслуживания одним оператором. Таким требованиям удовлетворяет вариант исполнения РПЗ, состоящий из ранца с аппаратурой (в котором расположен автономный источник питания, блок оцифровки, устройство управления и спецвычислитель) и поисковой штанги, на концах которой размещаются радиолокационный обнаружитель и пульт управления с индикатором (рис. 4).

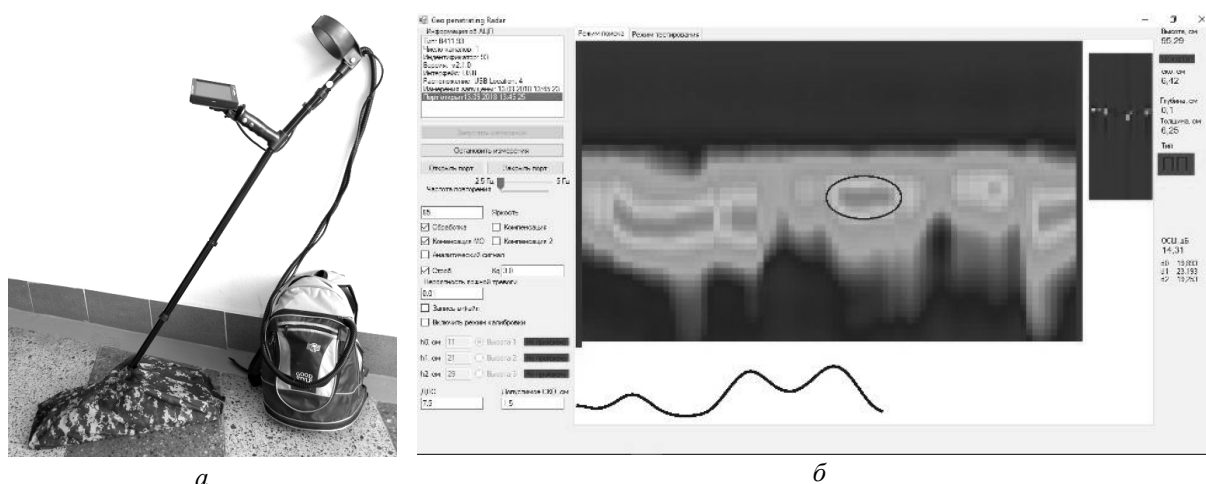


Рис. 4. Конструктивное исполнение РПЗ: *а* – общий вид; *б* – окно индикатора

Лабораторные апробация портативного ЛЧМ РПЗ

В процессе лабораторной апробации разработанного портативного ЛЧМ РПЗ исследовалась структура межэтажного железобетонного перекрытия с паркетным настилом

и бетонной стяжкой. Возможности РПЗ иллюстрируются рис. 4, б. Приведенное изображение представляет собой последовательно выведенные при горизонтальном сканировании АБ глубинные портреты, полученные в результате спектрального оценивания коррелограммным методом с вычтенным математическим ожиданием сигнала разностной частоты на выходе ФНЧ.

На рис. 4, б также виден результат работы алгоритма обнаружения: найден участок с максимальной СПМ, дана оценка размерам объекта и отдельно выведен результат спектрального оценивания по ММП предполагаемой области нахождения объекта.

Важно отметить, что РПЗ обладает повышенными требованиями к поддержанию заданной высоты АБ над тестируемой поверхностью r_z , что в значительной степени определяет стабильность конечного результата, отображаемого на экране монитора.

Заключение

Выработаны практические подходы к проектированию портативного радара с широкополосным непрерывным ЛЧМ излучением для подповерхностного зондирования заглубленных объектов. Особенности разработанного георадара являются синхронизация работы приемо-передающего тракта и вычислительной платформы, большой динамический диапазон тракта обработки и использование методов адаптивного спектрального анализа, что в сочетании с традиционным подходом формирования глубинного портрета зондируемого участка поверхности широкополосным ЛЧМ сигналом позволяет обнаруживать и распознавать объекты в неметаллическом исполнении. Выполненная реализация разработанной системы в виде лабораторного макета подтвердила эффективность предложенной системы. Результаты лабораторных исследований показали возможность визуализации подповерхностных объектов в реальном масштабе времени.

Список литературы

1. Филькенштейн М.И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1986. 128 с.
2. Вопросы подповерхностной радиолокации / А.Ю. Гринев [и др.]. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.
3. Komarov I.V., Smolskiy S.M., Barton D.K. Fundamentals of Short-Range FM Radar. Horwood.: Artech House Publishers, 2003. 314 p.
4. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004. 761 p.
5. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar for Buried Landmine and IED Detection // Unexploded Ordnance Detection and Mitigation. 2009. P. 89–111.
6. Марпл С.Л. мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
7. Гринкевич А.В., Савенко С.А. Повышение эффективности подповерхностного радиолокатора на основе нетрадиционных методов спектрального анализа // Наука и воен. безопасность. 2006. № 4. С. 38–41.
8. Лопатченко А.С., Малевич И.Ю., Савенко С.А. ЛЧМ-радиолокатор подповерхностного зондирования с повышенной разрешающей способностью // Докл. БГУИР. 2015. № 3 (89). С. 43–48.
9. Экспериментальные исследования и обоснование типа антенны для радара подповерхностного зондирования с непрерывным излучением / С.А. Савенко [и др.] // Наука и воен. безопасность. 2014. № 1 (41). С. 14–18.
10. Демьянюк Д.В., Чугай К.Н., Максимович Е.С. Имитационная модель сигнала, отраженного от заглубленного объекта, с учетом свойств укрывающей среды // Докл. БГУИР. 2018. № 4 (114). С. 27–31.
11. Проблематика построения радиолокатора подповерхностного зондирования / С.А. Савенко [и др.] // Наука и воен. безопасность. 2013. № 3. С. 20–27.

References

1. Fil'kenshtejn M.I. Primenenie radiolokacionnogo podpoverhnostnogo zondirovaniya v inzhenernoj geologii. M.: Nedra, 1986. 128 s. (in Russ.)
2. Voprosy podpoverhnostnoj radiolokacii / A.Ju. Grinev [i dr.]. M.: Radiotehnika, 2005. 416 s. (in Russ.)
3. Komarov I.V., Smolskiy S.M., Barton D.K. Fundamentals of Short-Range FM Radar. Horwood.: Artech House Publishers, 2003. 314 p.
4. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004. 761 p.

5. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar for Buried Landmine and IED Detection // Unexploded Ordnance Detection and Mitigation. 2009. P. 89–111.
6. Marpl S.L. ml. Cifrovoy spektral'nyj analiz i ego prilozhenija. M.: Mir, 1990. 584 s. (in Russ.)
7. Grinkevich A.V., Savenko S.A. Povyshenie jeffektivnosti podpoverhnostnogo radiolokatora na osnove netradicionnyh metodov spektral'nogo analiza // Nauka i voen. bezopasnost'. 2006. № 4. S. 38–41. (in Russ.)
8. Lopatchenko A.S., Malevich I.Ju., Savenko S.A. LChM-radiolokator podpoverhnostnogo zondirovanija s povyshennoj razreshajushhej sposobnost'ju // Dokl. BGUIR. 2015. № 3 (89). S. 43–48. (in Russ.)
9. Jeksperimental'nye issledovanija i obosnovanie tipa anteny dlja radara podpoverhnostnogo zondirovanija s nepreryvnym izlucheniem / S.A. Savenko [i dr.] // Nauka i voen. bezopasnost'. 2014. № 1 (41). S. 14–18. (in Russ.)
10. Dem'janjuk D.V., Chugaj K.N., Maksimovich E.S. Imitacionnaja model' signala otrazhennogo ot zaglublennogo ob'ekta s uchedom svojstv ukryvajushhej sredy // Dokl. BGUIR. 2018. № 4 (114). S. 27–31. (in Russ.)
11. Problematika postroenija radiolokatora podpoverhnostnogo zondirovanija / S.A. Savenko [i dr.] // Nauka i voen. bezopasnost'. 2013. № 3. S. 20–27. (in Russ.)

Сведения об авторах

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

Лопатченко А.С., ассистент 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., D.Sci, professor, head of the research laboratory «Noise protection of RF devices and systems» of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Lopatchenko A.S., assistant of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

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
Igor Yu. Malevich