



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-2-71-77>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.396.96

## ПРОЕКТНЫЙ ОБЛИК МОБИЛЬНОЙ РЛС МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ПОВЫШЕННОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬЮ

И.С. САДОВСКИЙ, Ю.Ю. БОБКОВ, И.Ю. МАЛЕВИЧ

ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 1 ноября 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Современным этапом развития радиолокационной техники метрового диапазона является разработка мобильных радиолокационных станций (РЛС) с расширенными функциями обзора пространства, формирования и обработки сигналов. Такие РЛС обеспечивают измерение координат воздушных объектов в 3D-пространстве с адаптивной сменой рабочей частоты, параметров зондирующего сигнала, поляризации и, наряду с решением непосредственно радиолокационных задач, позволяют проводить интегрированную обработку информации, выполнять анализ электромагнитной обстановки, вести радиоразведку, подавление помех, обладают высокой мобильностью и скрытностью. Достижение этих свойств возможно благодаря использованию цифровых антенных решеток с твердотельными цифровыми приемо-передающими модулями, модульному построению всех систем РЛС, использованию технологий цифрового диаграммообразования, адаптивных алгоритмов пространственно-временной и статистической обработки принимаемых сигналов. Проектный облик РЛС метрового диапазона, обладающей повышенной эффективностью и информативностью радиолокационного приема, возможностью быстрого перемещения и развертывания, рассмотрен в настоящей работе. Предложенная РЛС позволяет обеспечить измерение координат воздушных объектов в 3D-пространстве, выполнить дальнейшее обнаружение, сопровождение воздушных объектов всех типов, включая выполненные по стелс-технологии, проводить интегрированную обработку информации, радиоразведку, анализ электромагнитной обстановки и подавление помех, в том числе преднамеренных, создаваемых средствами радиоэлектронной борьбы.

**Ключевые слова:** РЛС метрового диапазона, цифровая антенная решетка.

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

**Для цитирования.** Садовский И.С., Бобков Ю.Ю., Малевич И.Ю. Проектный облик мобильной РЛС метрового диапазона с повышенной функциональностью. Доклады БГУИР. 2022; 20(2): 71-77.

## PROTOTYPE OF MOBILE METER WAVEBAND RADAR WITH IMPROVED FUNCTIONALITY

IGOR S. SADOVSKIY, YURI Y. BOBKOV, IGOR Y. MALEVICH

*JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 1 November 2021*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** Actual stage of meter waveband radar evolution is the design of mobile radar with improved surveillance functions, as well as signal generation and processing. Such radars measure coordinates of aircraft in 3D space with adaptive change of operation frequency, parameters of probing signal, and polarization. Except radiolocation tasks, such radars allow to carry out integral information processing, EM analysis, ELINT, as well as jamming and clutter canceling, and must have height mobility and secrecy properties. The achievement of these properties is possible due to the application of digital antenna arrays with digital solid-state Tx/Rx modules, modular construction of all radar subsystems, digital beamforming technology, adoptive algorithms of space-time, and statistical processing of received signals. The prototype of meter-wavelength band radar system with height effectivity and informativity of radiolocation receiving, with the capability of fast moving and deploying is review in this article. The proposed radar system allows to provide measuring coordinates of an aircraft in 3D space, large distance detection, tracking and targeting of all types of aircrafts (including stealth aircrafts), carry out integral processing of radiolocation information, ELINT, EM analysis, as well as jamming and clutter canceling.

**Keywords:** VHF-band radar, digital antenna array.

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

**For citation.** Sadovskiy I.S., Bobkov Y.Y., Malevich I.Y. Prototype of Mobile Meter Waveband Radar with Improved Functionality. Doklady BGUIR. 2022; 20(2): 71-77.

### Введение

Мобильные радиолокационные станции (РЛС) метрового диапазона характеризуются высокой эффективностью работы, которая, прежде всего, обусловлена применяемыми длинами волн, совпадающих с резонансным участком характеристик рассеяния большинства воздушных объектов, малым влиянием гидрометеоров, относительно высокими показателями когерентной компенсации мешающих отражений [1–4], а также простотой и оперативностью организации радиолокационного поля.

Одним из современных трендов развития радиолокационных средств диапазона метровых длин волн (далее – МВ) является расширение функций обзора пространства, формирования и обработки сигналов. Такие системы, реализуя измерение координат воздушных объектов в 3D-пространстве с адаптивной сменой рабочей частоты, параметров зондирующего сигнала (ЗС), поляризации, проводят радиоразведку, анализ электромагнитной обстановки, подавление помех, интегрированную обработку информации и одновременно выполняют обнаружение и сопровождение воздушных объектов всех типов.

Анализ выполненных проектов по разработке и модернизации мобильных РЛС метрового диапазона и полученных технических характеристик образцов показывает, что реализация комплекса многофункциональных свойств требует рассмотрения новых подходов и изменения концепции построения системы.

### Концепция построения

В общем случае задачи повышения функциональности и реализации актуальных для РЛС метрового диапазона технических характеристик (табл. 1) совместно могут быть решены в классе радиолокационных средств с цифровыми антенными решетками (ЦАР) [5–9].

**Таблица 1.** Актуальные параметры и технические характеристики РЛС диапазона МВ  
**Table 1.** Actual parameters and technical characteristics of VHF radar

Параметры и характеристики Parameters and characteristics	Значение Values
Дальность обнаружения цели с $RCS = 2\text{м}^2$ , км	300...400
Диапазон обнаружения воздушных объектов по высоте, км	0,1...20 (30)
Диапазон обнаружения по азимуту, град	0...360
Диапазон обнаружения по углу места, град	0,5...60 (70)
Диапазон электронного сканирования по азимуту, град, не менее	$\pm 30$
Диапазон обработки по скорости, м/с	0...3000
Ошибка по дальности, м	50...200
Ошибка по азимуту, град	0,5...0,7
Ошибка по скорости, м/с	3...5
Коэффициент подавления мешающих отражений, дБ	45...60
Коэффициент подавления активных шумовых помех (АШП), дБ, не менее	15
Подавление боковых лепестков	+
Быстрая перестройка несущей частоты	+
Быстрое изменение поляризации	+
Быстрое изменение типа зондирующего сигнала	+
Возможность определения высоты (эшелона) цели	+
Наличие аппаратуры радиолокационного запроса	+
Наличие аппаратуры ADS-B	+
Выполнение всех функций в составе одной транспортной единицы	+

В соответствии с принципами функционирования ЦАР формирование заданного распределения электромагнитного поля в раскрыве антенной решетки на передачу и прием производится поканально в модуле цифрового диаграммообразования (МЦДО). Каждый канал ЦАР образован излучающим элементом (ИЭ) и цифровым приемо-передающим модулем (ЦППМ) с независимым управлением от МЦДО. Это позволяет обеспечить индивидуальное управление амплитудой, фазой и частотой зондирующего и принятого сигналов и реализовать, наряду с электронным управлением лучом, быстрое изменение параметров ЗС (включая тип, закон модуляции, длительность, период повторения, мощность и частоту), выполнить пространственно-частотную обработку принятых сигналов (ПС), анализ электромагнитной обстановки, подавление помех и интегрированную обработку информации.

Для смены поляризации в диапазоне МВ в качестве ИЭ ЦАР возможно использование турникетных излучателей, располагаемых над сетчатым рефлектором [10]. При этом каждый ИЭ имеет два входа для излучения волн с вертикальной и горизонтальной поляризациями, а ЦППМ – два приемо-передающих выхода. Геометрические размеры рефлектора ИЭ определяются исходя из требований обеспечения защитного отношения на уровне боковых лепестков диаграммы направленности (ДН) ЦАР ( $-25$  дБ).

В типовых ЦАР, использующих для пеленгации воздушных объектов ДН карандашного типа, размер апертуры антенны определяется на основании требуемых параметров зоны обнаружения РЛС, ее разрешающей способности и точности определения координат. Так, для обеспечения точности определения угловых координат не хуже  $0,5^\circ$  ЦАР должна иметь размеры не менее 15 длин волн по каждой из координат. При этом в угломестной плоскости в диапазоне  $0...70$  град ЦАР формируется несколько ( $6...12$ ) парциальных лучей. Линейный размер каждой стороны плоскости такой ЦАР в метровом диапазоне составит  $25...30$  м. Очевидно, использование крупноапертурной ЦАР для реализации мобильной РЛС диапазона МВ, выполненной на базе одной транспортной единицы, является чрезвычайно трудной конструкторской задачей.

Известны конструкции мобильных двухкоординатных РЛС диапазона МВ с линейными одно- и двухрядными антенными решетками, практика эксплуатации которых показала их высокую скорость развертывания, способность перемещаться по дорогам общего пользования, а также возможность транспортировки железнодорожным и авиатранспортом. Эти системы с горизонтально ориентированной линейной антенной решеткой обеспечивают в азимутальной плоскости узкую ( $5...7^\circ$ ), а в угломестной широкую ( $40...70^\circ$ ) веерную ДН.

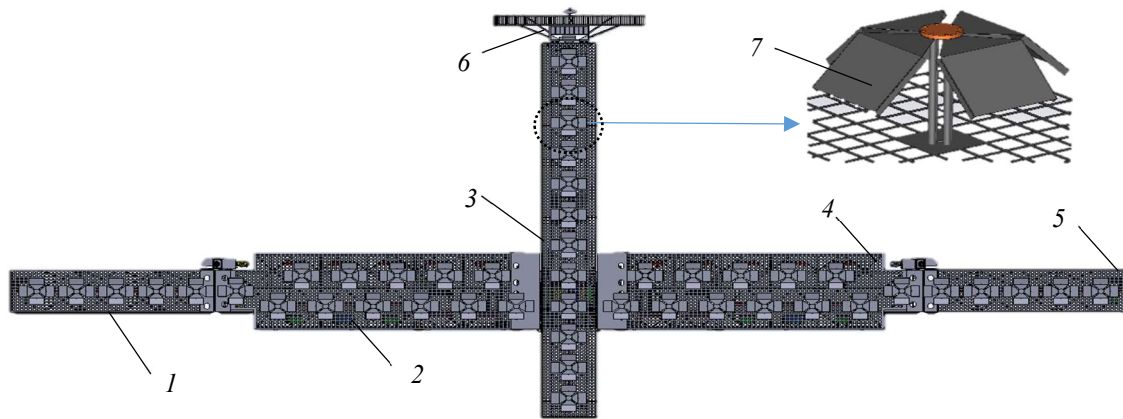
Использование ЦАР в таких РЛС позволит сформировать на прием широкий угломестный луч и выполнить электронное сканирование по азимуту в пределах  $\pm(5...10)$  град или в пределах, сопоставимых с шириной главного лепестка ДН. Однако увеличение в подобной конструкции диапазона фазового сканирования до  $\pm 30^\circ$  вызовет сильное искажение ДН, обусловленное эффектом конусности [11]. Это приведет к ошибкам определения азимута воздушных объектов, находящихся на одном азимутальном направлении, но под разными углами места. Учесть систематические ошибки, возникающие при фазовом сканировании веерной ДН, можно с помощью использования дополнительной линейной вертикальной приемной решетки коррекции оценок азимута цели и оценки эшелона высоты.

Для оценки эшелона высоты воздушного объекта, позволяющего учесть эффект конусности сканирующей веерной ДН, при названных выше параметрах ДН и диапазоне сканирования в угломестной плоскости  $0,5...70$  град достаточно иметь  $8...9$  парциальных ДН, получить которые возможно с использованием 12 ИЭ. Тогда ЦАР обеспечит формирование 9 ДН веерного типа в режиме приема: одна ДН с электронным сканированием в азимутальной плоскости и 8 парциальных приемных ДН в фиксированных сечениях угломестной плоскости. Интегрированная обработка, включающая совместную обработку радиолокационной информации, полученной от ИЭ, расположенных на горизонтально-ориентированной ферме ЦАР, и от ИЭ, размещенных на вертикально-ориентированной ферме, позволяет обеспечить реализуемость и функционирование конструкции в составе одной мобильной транспортной единицы.

Для повышения энергетического потенциала РЛС в центральной части ЦАР увеличено число ЦППМ и ИЭ размещаются в два ряда. Возникающее при этом обужение главного лепестка ДН в угломестной плоскости компенсируется наклоном плоскости ЦАР.

С целью обеспечения условия единственности главного лепестка ДН в секторе электронного сканирования по азимуту  $\pm 30^\circ$  и уменьшения взаимного влияния между ИЭ их расположение в центральной части ЦАР выполняется в узлах треугольной сетки. Суммарное число ИЭ в ЦАР составляет 46.

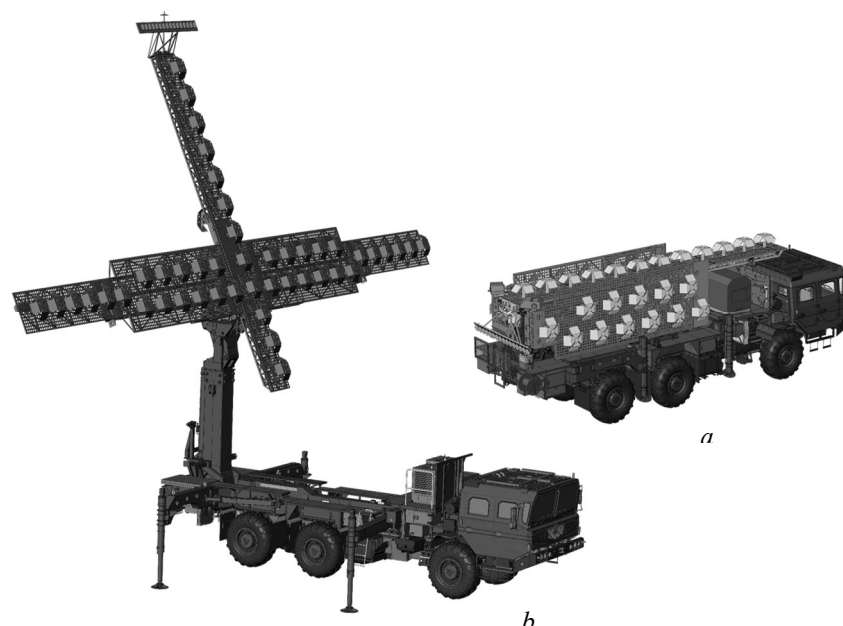
Таким образом, ИЭ ЦАР размещаются на каркасе фермового типа, состоящего из 5 ферм (рис. 1). Антенна наземного радиолокационного запросчика (НРЗ) устанавливается на верхней ферме ЦАР. ЦППМ располагаются между несущими элементами каркаса ЦАР.



1 – крайняя правая ферма (extreme right truss) АС; 2 – средняя правая ферма (middle right truss) АС; 3 – вертикальная ферма (vertical truss) АС; 4 – средняя левая ферма (middle left truss) АС; 5 – крайняя левая ферма (extreme left truss) АС; 6 – АУ НРЗ (IFF antenna); 7 – турникетный ИЭ (turnstile antenna)

**Рис. 1.** Общий вид антенной системы в рабочем положении  
**Fig. 1.** General view of antenna system in the operating position

Система свертывания-развертывания совместно с аппаратурой РЛС с помощью исполнительных механизмов, установленных на каждую подвижную часть мобильной платформы повышенной проходимости и антенного полотна, обеспечивает перевод ЦАР в транспортное или рабочее положение (рис. 2 [12]).



**Рис. 2.** Общий вид мобильной РЛС метрового диапазона с повышенной функциональностью в транспортном (а) и рабочем (б) положении  
**Fig. 2.** General view of the mobile meter waveband radar with improved functionality in transport (a) and operational (b) positions

Контроль работы исполнительных механизмов осуществляется датчиками контроля функционирования, данные с которых поступают на аппаратуру управления РЛС. Обзор пространства РЛС может осуществлять в режиме кругового обзора, реализуемого путем механического вращения антенной системы РЛС, и в режиме секторного обзора – посредством электронного сканирования.

Формирование заданного распределения электромагнитного поля в раскрыве ЦАР на передачу производится в вычислительной платформе РЛС цифровым способом. Числовые последовательности в виде команд, определяющих частоту, поляризацию, мощность, тип ЗС, его закон модуляции, длительность и период повторения, из вычислительной платформы подаются в соответствующие ЦППМ, где синтезируются ЗС. При излучении ЗС диаграмма направленности ЦАР формируется ИЭ, расположенными в горизонтальной плоскости антенного полотна.

Принятые сигналы с ИЭ поступают в ЦППМ, где выполняется выбор поляризации и преобразование в числовые последовательности, которые с помощью МЦДО взвешенно суммируются, образуя 1 дальномерный и 8 высотмерных лучей. Для борьбы с АШП, действующими с двух направлений по боковым лепесткам ДН, в МЦДО также формируются две компенсационные диаграммы направленности. Сигнальная информация, соответствующая 11 приемным лучам, в цифровом виде по высокоскоростной оптической линии передается в вычислительную платформу, располагаемую в кабине шасси РЛС. С помощью многоядерных специализированных компьютеров, объединенных в сеть, осуществляется: управление параметрами обзора РЛС; первичная и вторичная обработка радиолокационной информации; управление помехозащитой РЛС; объединение информации РЛС с информацией систем ADS-B и НРЗ и отображение всей информации на рабочем месте оператора.

Согласованная работа подсистем РЛС обеспечивается системой синхронизации, которая формирует опорные сигналы для всех составных частей программно-аппаратного комплекса. Внутрипериодная обработка всех радиолокационных каналов приема осуществляется одинаково, в частотной области, с последующим переходом во временную область. Для оптимизации разрешающей способности по дальности в РЛС, по решению оператора, могут использоваться различные типы широкополосных ЗС: с линейной частотной модуляцией, нелинейной частотной модуляцией с различными законами и фазокодоманипулированные.

С целью снижения уровня боковых лепестков сжатого сигнала применяется весовая обработка во временной области, которая решается путем умножения импульсной

характеристики согласованного фильтра на весовую функцию «окна».

Защиту РЛС от воздействия активных помех обеспечивает устройство помехозащиты (УПЗ), которое является продолжением пространственной обработки ПС. УПЗ решает задачи: когерентной компенсации мешающих излучений, действующих по боковым лепесткам ДН; подавления боковых ответов; защиты от несинхронных импульсных помех; оценки азимута постановщика АПП. Используя результаты анализа текущей электромагнитной обстановки, программа УПЗ в автоматическом или ручном режиме изменяет рабочую частоту, поляризацию, длительность, период повторения и закон модуляции ЗС.

Обработка радиолокационной информации, соответствующей различным 9 лучам ДН, осуществляется параллельно по одинаковым алгоритмам междупериодной обработки: когерентная компенсация мешающих отражений; когерентное накопление отраженного сигнала. Этапы некогерентного накопления и принятия решения об обнаружении цели реализуются в формирователе разовых оценок. Такое деление задач позволяет осуществить формирование каналов коррекции азимута, которые реализуются после квадратичного детектирования.

Непрерывный анализ помеховой обстановки позволяет реализовать эффективное адаптивное когерентное накопление ПС. При этом адаптация к неизвестным корреляционным свойствам принятого сигнала производится путем оценки коэффициента междупериодной корреляции сигнала, после чего рассчитываются параметры устройств когерентного накопления, некогерентного накопления и устройства принятия решения. Время наблюдения определяется при этом автоматически.

В ходе вторичной обработки радиолокационной информации в РЛС решается комплекс задач, связанных с обнаружением новых траекторий, отождествлением разовых отметок с сопровождаемыми траекториями, фильтрацией координат и параметров движения, экстраполяцией координат и параметров движения целей, удалением траекторий. Выходными параметрами устройства вторичной обработки являются оценки вектора состояния прямоугольных координат цели и оценки вектора состояния пеленгов на постановщики активных помех.

В целом, использование оригинальных алгоритмов обработки радиолокационной информации и методик статистического прогнозирования, разработанных в ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации» и хорошо зарекомендовавших себя в работе различных импульсных РЛС, позволяет гарантировать достижение актуальных параметров и технических характеристик в проекте мобильной РЛС метрового диапазона с повышенной функциональностью.

## Заключение

Представленный проект мобильной твердотельной РЛС метрового диапазона позволяет обеспечить измерение координат воздушных объектов в 3D-пространстве, выполнить дальнейшее обнаружение и сопровождение воздушных объектов всех типов, включая самолеты-невидимки; проводить интегрированную обработку информации, радиоразведку, анализ электромагнитной обстановки и подавление помех, в том числе преднамеренных, создаваемых средствами радиоэлектронной борьбы.

## Список литературы

1. Охрименко А.Е. *Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба*. Ч. 1. Москва: Воениздат; 1983.
2. Skolnik M.I. *Radar Handbook*. New York: McGraw Hill; 1990.
3. Kuschel H. VHF/UHF radar. Part I: Characteristics. *Electronics & Communication Engineering Journal*. 2002; April:61-72.
4. Kostromitski S.M., Shumski P.N., Sadovski I.S. Main directions of 3D radar development. *Proceedings of 6<sup>th</sup> international scientific conference on defensive technologies, ОТЕН-2014, Belgrade*. 2014:483-488.
5. Инденбом М.В. *Антенные решетки подвижных обзорных РЛС. Теория, расчет, конструкции*. Москва: Радиотехника; 2015.
6. *Бортовые антенные решетки и их элементы*. Под ред. Д.И. Воскресенского. Москва: Радиотехника; 2013.
7. Григорьев Л.Н. *Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках*. Москва: Радиотехника; 2011.

8. *Активные фазированные антенные решетки*. Под ред. В.Л. Гостюхина. Москва: Радиотехника; 2011.
9. Добычина, Е.М., Кольцов, Ю.В. Цифровые антенные решетки в бортовых радиолокационных системах. Москва: Изд-во МАИ; 2013.
10. Ротхаммель К., Кришке А. *Антенны*. Т. 2. Москва: ДМК Пресс; 2019.
11. Robert J.M. *Phased array antenna handbook*. London: Artech House; 2005.
12. Садовский И.С., Ненужный С.М., Бобков Ю.Ю., Малевич И.Ю. Концепт мобильной РЛС метрового диапазона с цифровой антенной решеткой. *Материалы 9-й Международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использования технологий двойного назначения, MILEX.INNOVATIONS-2021*. Минск; 2021: 11-15.

## References

1. Ohrimenko A.E. [*Radar fundamentals and EMWare*]. Part 1. Moscow: Voenizdat; 1983. (In Russ.).
2. Skolnik M.I. *Radar Handbook*. New York: McGraw Hill; 1990.
3. Kuschel H. VHF/UHF radar. Part I: Characteristics. *Electronics & Communication Engineering Journal*. 2002; April:61-72.
4. Kostromitski S.M., Shumski P.N., Sadovski I.S. Main directions of 3D radar development. *Proceedings of 6<sup>th</sup> international scientific conference on defensive technologies, OTEH-2014. Belgrade*. 2014:483-488.
5. Indenbom M.V. [*Antenna arrays of mobile surveillance radars. Theory, calculation, designs*]. Moscow: Radiotekhnika; 2015. (In Russ)
6. [*Airborne antenna arrays and their elements*]. Ed. D.I. Voskresensky. Moscow: Radiotekhnika; 2013. (In Russ)
7. Grigoriev L.N. [*Digital beamforming in phased array antennas*]. Moscow: Radiotekhnika; 2011. (In Russ.)
8. [*Active phased antenna arrays*]. Ed. V.L. Gostyukhin. Moscow: Radiotekhnika; 2011. (In Russ.)
9. Dobychina E.M, Koltsov Yu.V. [*Digital antenna arrays in airborne radar systems*]. Moscow: Publishing house MAI; 2013. (In Russ.)
10. Rothammel K., Krischke A. [*Antennas*]. Vol. 2. Moscow: Publishing: DМК Press; 2019. (In Russ.)
11. Robert J.M. *Phased array antenna handbook*. London: Artech House; 2005.
12. Sadovski I.S, Nenuzhny S.M. Bobkov Y.Y., Malevich I.Y. [Meter waveband radar concept with digital antenna array]. *Proceeding of 9-th International scientific conference on military-technical defense and security issues and dual-use technologies, MILEX.INNOVATIONS. 2021*. Minsk; 2021: 11-15.

## Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.  
All authors equally contributed to the writing of the article.

### Сведения об авторах

Садовский И.С., директор ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации», генеральный конструктор Республики Беларусь по средствам радиолокации, радио- и радиотехнической разведки и РЭБ.

Бобков Ю.Ю., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации».

Малевич И.Ю., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации».

### Адрес для корреспонденции

220026, Республика Беларусь,  
г. Минск, Партизанский пр-т, 64 а,  
ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»;  
тел. +375-017-390-57-26;  
e-mail: y.bobkov@kbradar.by  
Бобков Юрий Юрьевич

### Information about the authors

Sadovskiy I.S., Director of JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” Holding, General Designer of the Republic of Belarus on Radar, COMINT/ELINT and EW assets.

Bobkov Y.Y., Cand. of Sci., Associated Professor, Leading Researcher at JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” Holding.

Malevich I.Y., Dr. of Sci., Professor, Principal Research Scientist at JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” Holding.

### Address for correspondence

220026, Republic of Belarus,  
Minsk, 64 a, Partizanski Prospekt,  
JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” Holding;  
tel. +375-017-390-57-26;  
e-mail: y.bobkov@kbradar.by  
Bobkov Yuri Yur'evich