

Исследование характеристик радиофотонного устройства определения разности фаз радиолокационных сигналов

**Ярослав Николаевич Гусеница¹✉, Александр Леонтьевич Снегирев²,
Сергей Александрович Покотило³**

^{1, 2, 3} Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа, Краснодарский край, Россия,

²asneghome@gmail.com, ³pokotilo53@mail.ru

¹yaromir226@gmail.com✉, <http://orcid.org/0000-0003-4757-5066>

Аннотация. Рассмотрена задача точного вычисления разности фаз радиолокационных сигналов приёмных фазированных антенных решёток. Дан обзор различных методов определения разности фаз: методов на основе сравнения принимаемого сигнала с сигналом гетеродина, а также метода с применением радиофотонного аналого-цифрового преобразователя выходного сигнала приёмной фазированной антенной решётки. Предложены метод определения разности фаз и радиофотонное устройство, которые лишены недостатков описанных выше методов. Предложенный метод позволяет вычислять разность фаз радиолокационных сигналов на выходе электрооптического модулятора и выходного сигнала фотоприёмника с учётом известных значений амплитуд и разности фаз сверхвысокочастотных сигналов на входе приёмных элементов фазированной антенной решётки. В состав реализующего предложенный метод радиофотонного устройства, в отличие от известных аналогов, входят два параллельно включённых электрооптических модулятора, построенных по схеме интерферометра Маха-Цендера. Показано, что такое радиофотонное устройство обеспечивает более высокую точность определения разности фаз радиолокационных сигналов по сравнению с существующими аналогами. Проанализированы результаты экспериментальных исследований предложенного метода и радиофотонного устройства. По результатам проведённого эксперимента установлено, что значения разности фаз изменяются по линейному закону, а её максимум достигает значения π . Кроме того, произведение амплитуд оптических сигналов на входе фотонно-электронного блока прямо пропорционально разности фаз и обратно пропорционально отношению амплитуд выходных сигналов соседних приёмных элементов фазированной антенной решётки.

Ключевые слова: радиофотонное устройство, фазированная антенная решётка, разность фаз, амплитуда, радиолокационный сигнал, электрооптический модулятор, интерферометр Маха-Цендера

Для цитирования: Гусеница Я. Н., Снегирев А. Л., Покотило С. А. Исследование характеристик радиофотонного устройства определения разности фаз радиолокационных сигналов // Измерительная техника. 2021. № 2. С. 38–42. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-38-42>

Study of the characteristics of a radio photon device for determining the phase difference of a radar signals

Yaroslav N. Gusenitsa¹✉, Aleksandr L. Snegirev², Sergey A. Pokotilo³

^{1, 2, 3} Federal state autonomous institution "Military innovation technopolis "ERA", Anapa, Krasnodar Territory, Russia,

²asneghome@gmail.com, ³pokotilo53@mail.ru

¹yaromir226@gmail.com✉, <http://orcid.org/0000-0003-4757-5066>

Abstract. The paper considers the problem of accurate calculation of the phase of the radar signal in relation to the receiving phased antenna arrays. Methods for determining the phase difference based on a comparison of the received signal with the local oscillator signal are listed, as well as a method based on the use of a radio-photon analog-to-digital converter for the output signal of the receiving phased antenna array. Their disadvantages are indicated. A method and a radio photon device are proposed that are devoid of these disadvantages. The method allows you to calculate the phase difference of the radar signal at the output of the electro-optical modulator and the output signal of the photodetector, taking into account the known values of the amplitudes and phase difference of the microwave signals at the input of the receiving elements of the phased antenna array. The radio-photon device allows you to implement this method and, unlike the known analogues, is based on the use of two parallel-connected electro-optical modulators constructed according to the scheme of the Mach-Zehnder interferometer. It is shown that the proposed radio photon device provides a higher accuracy of determining the phase of the radar signal in comparison with existing analogues. At the end of the work, an analysis of the results of experimental studies using the proposed method and a radio photon device is presented. According to the results of the experiment, it was found that the phase and phase differences vary linearly, and their maximum reaches π . In addition, the square of the amplitude of the optical signal at the input of the photon-electronic unit is proportional to the phase difference and inversely proportional to the ratio of the amplitudes of the output signals of the adjacent receiving elements of the phased antenna arrays.

Keywords: radio-photon device, phased array, phase, amplitude, radar signal, electro-optical modulator, Mach-Zehnder interferometer

Введение. Одним из актуальных вопросов в области радиолокации является задача точного вычисления фазы радиолокационных сигналов приёмных фазированных антенных решёток (ФАР). Решение данной задачи заключается в том, что точность измерения фазы напрямую связана с точностью измерения координат обнаруживаемого объекта, т. е. чем выше точность измерения разности фаз сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов, тем выше точность измерения координат наблюдаемого объекта по азимуту и дальности.

В настоящее время существуют такие приёмные ФАР, у которых значения разности фаз сигналов, принимаемых каждым элементом решётки, вычисляются путём сравнения принимаемого сигнала с сигналом гетеродина [1–5]. При этом, как правило, используют один из методов определения разности фаз: компенсационный метод с применением фазовращателя; метод преобразования разности фаз при умножении и последующем гетеродинном преобразовании частоты принимаемых сигналов; методы, основанные на преобразовании разности фаз в напряжение или в интервал времени; метод фазовой автоподстройки частоты гетеродина и др.

Перечисленным методам присущи многочисленные недостатки, в том числе большие методические погрешности в СВЧ-диапазоне (на частотах дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов), неоднозначность измерения фазы, возможность ошибки определения знака фазы и др. Поэтому актуальной задачей является устранение указанных недостатков. Эту задачу можно успешно решить с использованием методов и средств радиофотоники. Радиофотоника – фундаментальное научно-техническое направление, связанное с взаимодействием оптических и СВЧ-сигналов и с созданием систем и устройств на его основе. Основными функциональными элементами радиофотоники являются лазеры, приёмники и модуляторы оптического излучения, фотонные интегральные схемы, СВЧ-диоды, а также узлы и модули на основе сочетания этих элементов между собой и со сверхскоростной цифровой и аналоговой компонентной базой микроэлектроники.

В настоящее время в рамках данного направления многими отечественными и зарубежными учеными и практиками ведутся разработки новых методов и отдельных радиофотонных устройств взаимодействия с электромагнитным излучением СВЧ-диапазона [6–20]. Анализ существующих работ показывает, что недостаточно проработан вопрос определения разности фаз принимаемых радиолокационных сигналов с использованием радиофотоники. Здесь заслуживает внимания работа [8], в которой описаны способы и устройства реализации радиофотонных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) выходного сигнала приёмного элемента ФАР. Одно из описанных устройств содержит соединённые последовательно и функционально связанные импульсный источник оптического излучения, электрооптический модулятор, фотонно-электронный блок, АЦП и вычислитель. На модулирующий вход электрооптического модулятора с выхода ФАР поступает аналоговый сигнал, представляющий собой смесь выходного сигнала антенной решётки и сигнала гетеродина. Недостатками описанных метода и устройства являются сложность определения разности фаз выходных

сигналов каждого приёмного элемента ФАР и низкая точность измерений.

Цель настоящей работы – предложить новый метод и реализующее его радиофотонное устройство определения разности фаз радиолокационных сигналов СВЧ-диапазона, что позволит упростить вычисления и повысить точность результатов измерений.

Метод определения разности фаз радиолокационных сигналов. Предложенный метод исключает необходимость использования фазометров и фазовращателей и основан на анализе разности оптических сигналов, которые модулируются СВЧ-сигналами, поступающими с приёмных элементов ФАР на модулирующие входы электрооптических модуляторов.

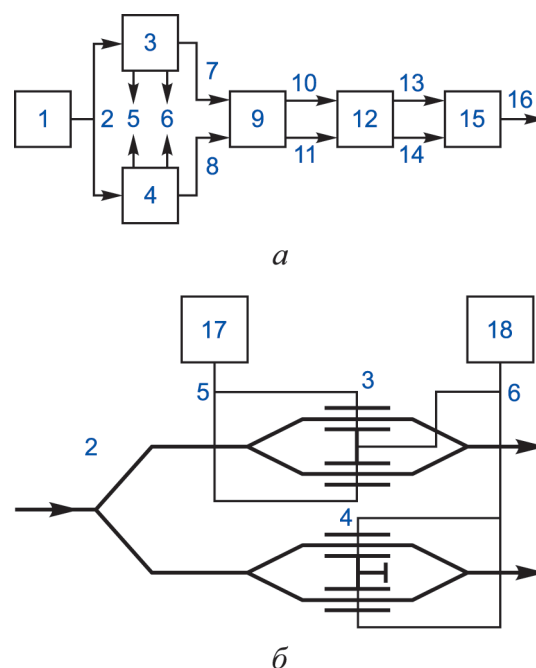


Рис. 1. Схемы радиофотонного устройства определения разности фаз радиолокационных сигналов (а) и формирования разности фаз выходных модулирующих сигналов электрооптических модуляторов (б):

1 – источник оптического излучения; 2 – оптический разветвитель; 3, 4 – электрооптические модуляторы; 5, 6 – входные аналоговые электрические сигналы; 7, 8 – выходные сигналы электрооптических модуляторов; 9 – фотонно-электронный блок; 10, 11 – выходные сигналы фотонно-электронного блока; 12 – АЦП; 13, 14 – выходные сигналы АЦП; 15 – вычислитель; 16 – вычисленное значение фазы выходного сигнала ФАР; 17, 18 – соседние приёмные элементы ФАР

Fig. 1. Functional diagram of a radio photon device for determining the phase of a radar signal:

1 – a source of optical radiation; 2 – optical splitter; 3, 4 – electro-optical modulators; 5, 6 – input analog electrical signals; 7, 8 – output signals of electro-optical modulators; 9 – photon-electronic unit; 10, 11 – output signals of the photon-electronic unit; 12 – ADC; 13, 14 – ADC output signals; 15 – calculator; 16 – the calculated phase value of the output signal of the phased array antenna; 17, 18 – adjacent receiving elements of the phased array antenna

Пусть существуют фазы $\varphi_1 = \varphi$, $\varphi_2 = 0$ и известны разности $X_1 - X_2 = \Delta X$ сигналов $X_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi)$, $X_2 = A_2 \sin \omega t$ с приблизительно равными амплитудами $A_1 \approx A_2 = A$ (где ω – круговая частота, t – время). Тогда разность фаз $\Delta \varphi$ можно определить по формуле

$$\Delta \varphi = \arcsin(\Delta X / A + \sin \omega t) - \omega t.$$

При $A_1 \neq A_2$ справедлива формула

$$\Delta \varphi = \arcsin[(\Delta X + A_2 \sin \omega t) / A_1] - \omega t.$$

При известной сумме сигналов X_1 , X_2 имеем

$$A_1 \sin(\omega t + \Delta \varphi) + A_2 \sin \omega t = X_1 + X_2.$$

После несложных преобразований получаем следующую формулу вычисления разности фаз:

$$\Delta \varphi = \arcsin[(X_1 + X_2 - A_2 \sin \omega t) / A_1] - \omega t. \quad (1)$$

Радиофотонное устройство определения разности фаз радиолокационных сигналов. Для реализации представленного выше метода предложено радиофотонное устройство, в отличие от аналога [8], дополнительно содержащее оптический разветвитель и второй электрооптический модулятор. Принцип работы данного устройства и схема формирования разности фаз выходных модулирующих сигналов электрооптических модуляторов показаны на рис. 1. Радиофотонное устройство работает следующим образом.

Оптические выходные сигналы лазера 1 непрерывного излучения поступают через оптический разветвитель 2 на оптические входы двух электрооптических модуляторов 3, 4, выполненных по схеме интерферометра Маха-Цендера [6] и включённых параллельно. На модулирующие входы этих же электрооптических модуляторов поступают

аналоговые электрические выходные сигналы двух соседних приёмных элементов ФАР. Промодулированные оптические сигналы преобразуются в фотонно-электронном блоке 9 в электрические сигналы 10, 11, а затем в АЦП 12 – в цифровые сигналы 13, 14. Выходы АЦП соединены с входами вычислителя 15, на который поступают два сигнала в цифровой форме. Первый сигнал 13 содержит информацию о разности фаз выходных сигналов ФАР, а второй 14 – информацию об амплитуде одного из приёмных элементов ФАР. Если принять амплитуду A_1 сигнала X_1 за единицу, т. е. произвести нормировку, то разность фаз (при $\varphi_1 = \varphi$, $\varphi_2 = 0$) вычисляется по формуле (1). Для осуществления параллельного преобразования сигналов двух соседних приёмных элементов ФАР фотонно-электронный блок и АЦП выполнены двухканальными.

Анализ результатов экспериментальных исследований. Характеристики разработанного радиофотонного устройства определения разности фаз радиолокационных сигналов изучали на основе результатов экспериментальных исследований. С помощью двух генераторов задавали диапазон модулирующих сигналов от 100 МГц до 10 ГГц. Длина волны лазерного излучения составляла 1550 нм. По результатам экспериментов строили зависимости изменения амплитуды и фазы выходного сигнала фотонно-электронного блока от текущего значения ωt (рис. 2). Амплитудно-частотные спектры выходного сигнала фотонно-электронного блока при разности фаз $\Delta \varphi = \pi$; 0 представлены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что значения уровня выходного сигнала фотоприёмника зависят от разности фаз, а минимум выходного сигнала достигается при $\Delta \varphi = \pi$. Уровень выходного сигнала фотоприёмника составляет –117 дБм при уровне шумов –120 дБм. При разности фаз $\Delta \varphi = 0$ уровень выходного сигнала фотоприёмника составляет –43 дБм. Таким образом, с использованием предложенной схемы формирования разности фаз динамический диапазон измерения разности фаз составляет 73 дБм.

Экспериментально установлено, что при частотах от 300 МГц до 4 ГГц динамический диапазон определения разности фаз изменяется незначительно.

Из анализа представленных на рис. 2, 3 зависимостей следуют два вывода: разность фаз изменяется по линейному закону, а её максимальное и минимальное значения соответственно равны π и 0; произведение амплитуд оптических сигналов на входе фотонно-электронного блока прямо пропорционально разности фаз и обратно пропорционально отношению амплитуд выходных сигналов соседних приёмных элементов ФАР. Заметим, что классическими методами с применением радиоэлектронного гетеродина затруднительно получить данные результаты.

Оценка погрешности измерения разности фаз СВЧ-сигналов. Для существующих устройств измерения разности фаз СВЧ-сигналов характерны большие погрешности результатов измерений [2, 3], обусловленные использованием нелинейного элемента – СВЧ-смесителя. СВЧ-смеситель вносит амплитудно-фазовые искажения

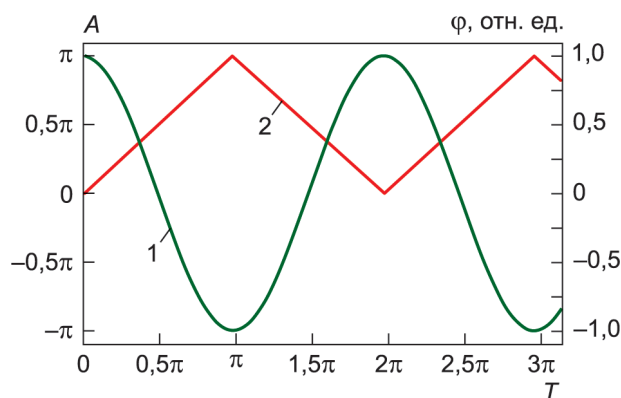


Рис. 2. Изменения амплитуды (1) и фазы (2) выходного сигнала фотонно-электронного блока

Fig. 2. Graphs of the amplitude (1) and phase (2) of the output signal of the photon-electronic unit

в преобразуемые радиосигналы и как аналоговый фазометр обеспечивает измерение разности фаз с абсолютной погрешностью в пределах $0,5-1^\circ$ [3]. В состав предложенного радиопотонного устройства, в отличие от аналогов, входит не СВЧ-смеситель, а специальный микроконтроллер, который обеспечивает автоматический выбор рабочей точки электрооптических модуляторов исключительно на линейных участках их модуляционных характеристик. Поэтому в выходном сигнале фотонно-электронного блока отсутствуют методическая и инструментальная погрешности, вносимые СВЧ-смесителем. Погрешность измерения разности фаз СВЧ-сигналов определяется уровнем суммарного внутреннего шума полупроводниковых фотоприёмников, осуществляющих фотонно-электронное преобразование выходных сигналов электрооптических модуляторов.

Соответствующий динамическому диапазону 73 дБм (см. рис. 3) АЦП, описанный в [21, 22], должен иметь не менее 12 разрядов. Таким образом, при измерении разности фаз максимально возможное значение абсолютной погрешности измерения разности фаз будет составлять $180^\circ/4096=0,0439^\circ$, где 180° – максимально возможное значение разности фаз; $4096=2^{12}$, 12 – количество разрядов АЦП. Следовательно, разработанное радиопотонное устройство измерения разности фаз радиолокационных сигналов обеспечивает уменьшение погрешности измерения разности фаз более чем на порядок.

Заключение. Применение предложенных метода и радиопотонного устройства позволяет упростить вычисления и повысить точность определения разности фаз выходных сигналов приёмных элементов ФАР. Погрешность определения разности радиолокационных сигналов ФАР определяется уровнем суммарного внутреннего шума полупроводникового приёмника. Следует отметить, что стоимость предлагаемого радиопотонного устройства главным образом определяется стоимостью входящих в его состав электрооптических модуляторов. Так, стоимость импортных малогабаритных кристаллических аналоговых электрооптических модуляторов на ниобате лития LiNbO_3 с длиной волны $\lambda=1550$ нм и разбросом частот $\Delta f=40$ ГГц (www.Optilab.com (дата обращения: 16.07.2020)) составляет \$3395, а стоимость цельноволокнистых электрооптических модуляторов с теми же параметрами составляет \$350 (<http://pvd-audio.com/wp-content/uploads/2016/06/Teoriya-TSAP-ATSP.pdf> (дата обращения: 16.07.2020)). Однако как за рубежом, так и в нашей стране ведутся разработки плазмонных модуляторов Маха-Цендера, которые имеют линейные размеры порядка 25 мкм и могут встраиваться в кремниевую электронику. Их создание приведёт к резкому снижению стоимости указанных выше компонентов радиопотонных устройств [21].

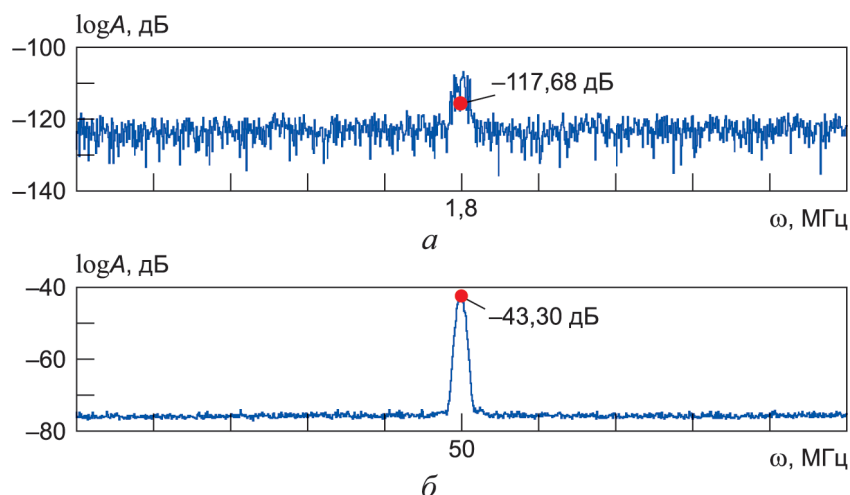


Рис. 3. Амплитудно-частотные спектры выходного сигнала фотонно-электронного блока при разности фаз $\Delta\varphi=\pi$; 0 – а, б соответственно; начальная частота 200 МГц, максимальная частота 299,8 МГц, фазовая подстройка частоты 1,8 МГц, опорный уровень –40 дБ, свипирование 1 мс

Fig. 3. The amplitude-frequency spectrum of the output signal of the photon-electronic unit with a phase difference $\Delta\varphi=\pi$ (a), $\Delta\varphi=0$ (b); initial frequency 200 MHz, maximum frequency 299.8 MHz, phase adjustment of frequency 1.8 MHz, reference level –40 dB, sweep 1 ms

Список литературы

1. Ахияров В. В., Нефедов С. И., Николаев А. И., Служин Г. П., Федоров И. Б., Шустиков В. Ю. Радиолокационные системы. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 352 с.
2. Дамдинова Д. Б., Полетаев А. С., Ченский А. Г. Сравнение точности методов вычисления разности фаз квазигармонических сигналов // Вестник СибГУТИ. 2017. № 2 (38). С. 87–97.
3. Коротков К. С., Фролов Д. Р., Левченко А. С. Анализ методов измерения истинного сдвига фаз смесителей сверхвысокой частоты // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 8. С. 873–880.
4. Малыгин А. Н., Прасяко А. Д., Троценко И. В. Устройство оценки разности амплитуд, частот и фаз синусоидальных электрических колебаний // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 2. С. 533–538.
5. Овчинников Ф. В., Сухотин В. В. Измерение разности фаз сигналов в системах спутниковой связи с использованием одного геостационарного ИСЗ // Исследования наукограда. 2017. Т. 1. № 1 (19). С. 30–37.
6. Афанасьев В. М. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха-Цендера // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 4. С. 341–369.
7. Белоусов А. А. Особенности проектирования многоканальных СВЧ устройств миллиметрового диапазона // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2. № 4. С. 522–527.
8. Вольхин Ю. Н., Тихонов Е. В. Обзор возможных способов реализации радиопотонных АЦП диапазона СВЧ // Материалы V юбилейной общероссийской научно-технической

конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем», Омск, 7–8 октября 2014. Омск: Омский государственный технический университет, 2014. С. 87–104.

9. Бирюков В. В., Грачев В. А., Лобин С. Г., Палачев М. А., Раевский А. С. Реализация устройств генерации и преобразования сигналов СВЧ-диапазона методами радиофотоники // *Антенны*. 2017. № 11 (243). С. 63–70.

10. Конторов С. М., Шипулин А. В., Кюпперс Ф., Валуев В. В. Многоканальный радиофотонный приемный тракт // *Фотоника*. 2019. Т. 13. № 6. С. 584–593.

11. Морозов О. Г., Ильин Г. И., Морозов Г. А. Системы радиофотоники с последовательным амплитудно-фазовым преобразованием оптической несущей // *Фотон-экспресс*. 2017. № 6 (142). С. 104–105.

12. Чиров Д. С., Кочетков Ю. А. Применение технологий радиофотоники в интересах формирования и обработки широкополосных радиолокационных сигналов // *DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов*. 2020. Т. 10. № 1. С. 15–24.

13. Capmany J., Ortega B., Pastor D., *Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 1, pp. 201–229. <https://doi.org/10.1109/JLT.2005.860478>

14. Cox C. H., Ackerman E. I., *Avionics, Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP)*, 2013. <https://doi.org/10.1109/AVFOP.2013.6661612>

15. Hervás J., Ricchiuti A. L., Li W., Zhu N. H., Fernández-Pousa C. R., Sales S., Li M., Capmany J., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, vol. 23, no. 2, p. 5602013. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2017.2651117>

16. Kontorov S. M., Cherepenin V. A., Kulagin V. V., Prokhorov D. A., Shulunov A. N., Valuev V. V., *Progress In Electromagnetics Research Symposium Abstracts*, Toyama, Japan, 1–4 August, 2018, pp. 967–972. <https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8598200>

17. Manka M. E., *Proceeding of the 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conferences*, pp. 275–278. <https://doi.org/10.1109/MWP.2008.4666690>

18. Pan S., Yao J., *Journal of Lightwave Technology*, 2017, vol. 35, no. 16, pp. 3498–3513. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2587580>

19. Raevskii A. S., Biryukov V. V., Grachev V. V., Kapustin S. A., Lobin S. G., *Proc. of SPIE “Optical Technologies for Telecommunications–2016”*, 2016, vol. 10342, p. 103420K-1-103420K-6. <https://doi.org/10.1117/12.2270386>

20. Yao J., *Proc. of the 2008 International Conference on Advanced Infocomm Technology ProICAIT-08*, 2008, p. 135. <https://doi.org/10.1145/1509315.1509450>

21. Федянин Д. Ю. Усиление поверхностных плазмон-поляритонов в наноразмерных волокнах: дис. канд. физ.-мат. наук (МФТИ, Долгопрудный, 2012).

References

1. Akhiyarov V. V., Nefedov S. I., Nikolaev A. I., Slukin G. P., Fedorov I. B., Shustikov V. Yu., *Radiolokatsionnye sistemy*, Moscow, MGU im. N. Eh. Baumana Publ., 2016, 352 p. (in Russian).

2. Damdinova D. B., Poletaev A. S., Chenskii A. G., *Vestnik SiBGUTI*, 2017, no. 2 (38), pp. 87–97 (in Russian).

3. Korotkov K. S., Frolov D. R., Levchenko A. S., *Radiotekhnika i elektronika*, 2015, vol. 60, no. 8, pp. 873–880 (in Russian).

4. Malygin A. N., Pras'ko A. D., Trotsenko I. V., *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 2, pp. 533–538 (in Russian).

5. Ovchinnikov F. V., Sukhotin V. V., *Issledovaniya nauko-grada*, 2017, vol. 1, no. 1 (19), pp. 30–37 (in Russian).

6. Afanas'ev V. M., *Prikladnaya fotonika*, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 341–369 (in Russian).

7. Belousov A. A., *Infokommunikatsionnye i radioelektronnye tekhnologii*, 2019, vol. 2, no. 4, pp. 522–527 (in Russian).

8. Vol'khin YU. N., Tikhonov Ye. V., *Proceeding of the V International Scientific and Practical (Technical) Conference “Obmen opytom v oblasti sozdaniya sverkhshirokopolosnykh radioelektronnykh sistem”*, Omsk, 7–8 October 2014, Omsk, Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet Publ., pp. 87–104 (in Russian).

9. Biryukov V. V., Grachev V. A., Lobin S. G., Palachev M. A., Raevskii A. S., *Antenny*, 2017, no. 11 (243), pp. 63–70 (in Russian).

10. Kontorov S. M., Shipulin A. V., Kyuppers F., Valuev V. V., *Fotonika*, 2019, vol. 13, no. 6, pp. 584–593 (in Russian).

11. Morozov O. G., Il'in G. I., Morozov G. A., *Foton-ehkspress*, 2017, no. 6 (142), pp. 104–105 (in Russian).

12. Chirov D. S., Kochetkov Yu. A., *DSPA: Voprosy primeneniya tsifrovoy obrabotki signalov*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 15–24 (in Russian).

13. Capmany J., Ortega B., Pastor D., *Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 1, pp. 201–229. <https://doi.org/10.1109/JLT.2005.860478>

14. Cox C. H., Ackerman E. I., *Avionics, Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP)*, 2013. <https://doi.org/10.1109/AVFOP.2013.6661612>

15. Hervás J., Ricchiuti A. L., Li W., Zhu N. H., Fernández-Pousa C. R., Sales S., Li M., Capmany J., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, vol. 23, no. 2, p. 5602013. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2017.2651117>

16. Kontorov S. M., Cherepenin V. A., Kulagin V. V., Prokhorov D. A., Shulunov A. N., Valuev V. V., *Progress In Electromagnetics Research Symposium Abstracts*, Toyama, Japan, 1–4 August, 2018, pp. 967–972. <https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8598200>

17. Manka M. E., *Proceeding of the 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conferences*, pp. 275–278. <https://doi.org/10.1109/MWP.2008.4666690>

18. Pan S., Yao J., *Journal of Lightwave Technology*, 2017, vol. 35, no. 16, pp. 3498–3513. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2587580>

19. Raevskii A. S., Biryukov V. V., Grachev V. V., Kapustin S. A., Lobin S. G., *Proc. of SPIE “Optical Technologies for Telecommunications–2016”*, 2016, vol. 10342, pp. 103420K-1–103420K-6. <https://doi.org/10.1117/12.2270386>

20. Yao J., *Proc. of the 2008 International Conference on Advanced Infocomm Technology ProICAIT-08*, 2008, p. 135. <https://doi.org/10.1145/1509315.1509450>

21. Fedyanin D. Yu., Dissertation of the candidate of physical and mathematical sciences (MFTI (GU), Dolgoprudny, 2012).

Статья поступила в редакцию 16.06.2020; принята к публикации 30.09.2020