

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-977-983

УДК 621.38

Методы определения разности фаз выходных сигналов приемных элементов фазированной антенной решетки в радиофотонной схеме с параллельным и последовательным попарным соединением электрооптических модуляторов

Ярослав Николаевич Гусеница¹✉, Андрей Владимирович Морозов²,
Сергей Александрович Покотило³, Александр Леонтьевич Снегирев⁴

^{1,2,3,4} Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, 353456, Российская Федерация

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

² era_1@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5003-8718>

³ era_1@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5401-8615>

⁴ era_1@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9908-9492>

Аннотация

Получение точных значений фаз выходных сигналов приемных элементов фазированной антенной решетки одна из актуальных задач, связанных с применением радиофотонных технологий в радиолокации и радиосвязи. В работе рассмотрена задача измерения разности фаз выходных сигналов приемных элементов фазированной антенной решетки с использованием электрооптических модуляторов Маха–Цендера в составе радиофотонного устройства. Формализованы зависимости выходных сигналов приемников оптического сигнала и разности фаз выходных сигналов приемных элементов фазированной антенной решетки в радиофотонной схеме для различных вариантов соединения электрооптических модуляторов Маха–Цендера. Предложены методы определения разности фаз выходных сигналов приемных элементов фазированной антенной решетки на основе параллельного и последовательного включения электрооптических модуляторов Маха–Цендера в радиофотонные устройства. Выполнена сравнительная оценка предложенных методов. Показано, что метод, основанный на определении разности фаз при параллельном соединении электрооптических модуляторов, дает в 1,58 раза меньшую погрешность по сравнению с методом при последовательном соединении. Представлено описание радиофотонной схемы фазового пеленгатора. Предложенная схема обеспечивает высокую точность измерений разности фаз выходных сигналов отдельных приемных элементов фазированной антенной решетки. Результаты работы могут быть применены специалистами, которые занимаются исследованиями и разработками в области перспективных систем радиолокации и радиосвязи.

Ключевые слова

радиофотонный фазовый пеленгатор, фазированная антенная решетка, разность фаз, радиолокационный сигнал, электрооптический модулятор, модулятор Маха–Цендера

Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР «Перспектива-Ф-ЭРА», выполняемая в рамках Плана научной работы Вооруженных сил Российской Федерации. Авторы выражают благодарность Главному управлению инновационного развития Министерства обороны Российской Федерации за поддержку в проведении исследований.

Ссылка для цитирования: Гусеница Я.Н., Морозов А.В., Покотило С.А., Снегирев А.Л. Методы определения разности фаз выходных сигналов приемных элементов фазированной антенной решетки в радиофотонной схеме с параллельным и последовательным попарным соединением электрооптических модуляторов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 6. С. 977–983. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-977-983

Methods for determining the phase difference of the output signals for the receiving elements of a phased antenna array in a radiophoton circuit with parallel and series pairwise connection of electro-optical modulators

Yaroslav N. Gusenitsa¹, Andrey V. Morozov², Sergey A. Pokotilo³, Alexandr L. Snegirev⁴

^{1,2,3,4} Military innovative technopolis “ERA”, Anapa, 353456, Russian Federation

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

² era_1@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5003-8718>

³ era_1@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5401-8615>

⁴ era_1@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9908-9492>

Abstract

Obtaining accurate phase values of the output signals for the receiving elements of a phased array antenna is one of the crucial issues relating to radio-photon technologies in radar and radio communication. The paper considers measuring the phase difference of the output signals for the receiving elements of a phased array antenna using electro-optical Mach–Zehnder modulators as part of a radio-photon device. The dependences of the output signals of the optical signal receivers and the phase difference of the output signals for the receiving elements of the phased antenna array in the radio-photon scheme are formalized for different variants of the connection of electro-optical Mach–Zehnder modulators. The authors propose the methods for determining the phase difference of the output signals for the receiving elements of a phased array antenna based on parallel and series connection of electro-optical Mach–Zehnder modulators into radio-photon devices. A comparative assessment of the proposed methods is carried out. It is shown that the method based on the determination of the phase difference with the parallel connection of electro-optical modulators produces 1.58 times less error than the method with the series connection. The description of the radio-photon scheme of the phase direction finder is presented. The proposed scheme provides high accuracy in measuring the phase difference of the output signals for individual receiving elements of a phased array antenna. The results of the work can be applied by specialists in the field of advanced radar and radio communication systems.

Keywords

radio-photon phase direction finder, phased array antenna, phase difference, radar signal, electro-optical modulator, Mach–Zehnder modulator

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the research project “Perspective-F-ERA” as part of the Plan of scientific work of the Armed Forces of the Russian Federation. The authors express their gratitude to the Main Directorate of Innovative Development of the Ministry of Defense of the Russian Federation for support in conducting research.

For citation: Gusenitsa Ya.N., Morozov A.V., Pokotilo S.A., Snegirev A.L. Methods for determining the phase difference of the output signals for the receiving elements of a phased antenna array in a radiophoton circuit with parallel and series pairwise connection of electro-optical modulators. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 977–983 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-977-983

Введение

В настоящее время в области радиолокации и радиосвязи широкое применение получают радиофотонные технологии. Одна из актуальных задач, связанная с применением данных технологий — получение точных значений фаз выходных сигналов приемных элементов фазированной антенной решетки (ФАР), о чем свидетельствует множество научных работ. В работе [1] приведено сравнение точности методов вычисления разности фаз квазигармонических сигналов. В [2] выполнен анализ методов измерения истинного сдвига фаз смесителей сверхвысокой частоты. В [3] представлен метод измерения разности фаз сигналов в системах спутниковой связи. В работах [4–6] описаны технические решения оценки разности фаз синусоидальных электрических колебаний.

Погрешность измерений фазы (разности фаз) радиолокационных сигналов зависит от значения интервала интегрирования суммы или произведения сигналов приемных (например, двух соседних) элементов ФАР. Известно, что чем больше интервал интегрирования и больше обработано попарно перемноженных сигналов, тем меньше погрешность измерений разности фаз и

выше точность определения азимута и угла места пеленгуемого источника излучения.

Важное место в решении указанной выше задачи отводится электрооптическим модуляторам (ЭОМ) Маха–Цендера, которые применяются в радиофотонных устройствах для модуляции радиосигналом лазерного пучка. Например, в [7] раскрыты общие принципы работы ЭОМ Маха–Цендера. В работах [8–20] описаны особенности реализации различных сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств и радиофотонных методов на основе применения ЭОМ. Вместе с тем вопрос определения зависимости выходного сигнала приемника оптического излучения (ПОИ) от разности фаз радиолокационных сигналов приемных элементов ФАР при параллельном и последовательном соединениях ЭОМ остается недостаточно освещенным.

Расчет выходного сигнала ПОИ при параллельном соединении электрооптических модуляторов

Рассмотрим случай одночастотного СВЧ-сигнала, поступающего на антенные элементы ФАР. Предположим, что ЭОМ, ПОИ и сумматор не вносят значительную погрешность в результаты измерений.

Сигналы на выходах n приемных элементов ФАР представим системой n алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} U_1 &= A_1 \sin(\omega t + \varphi_1), \\ U_2 &= A_2 \sin(\omega t + \varphi_2), \\ &\dots \\ U_n &= A_n \sin(\omega t + \varphi_n), \end{aligned} \quad (1)$$

где A_1, A_2, \dots, A_n — амплитуды сигналов; $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ — начальные фазы сигналов; ω — циклическая частота сигналов.

При приеме сигналов X_1 и X_2 с выходов, параллельно включенных ЭОМ Маха–Цендера (рис. 1), энергия I выходного сигнала $\Delta\varphi$ ПОИ будет пропорциональна квадрату суммы амплитуд сигналов за период T .

Пусть $U_1 = A_1(t)$ и $U_2 = A_2(t)$. Найдем интенсивность (интеграл квадрата суммы двух сигналов) $I(A_1, A_2, \varphi)$ на выходе ПОИ на примере двух первых сигналов системы уравнений (1) при $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = \varphi$:

$$\begin{aligned} I(A_1, A_2, \varphi) &= \int_0^T [A_1 \sin \omega t + A_2(\omega t + \varphi)]^2 dt = \\ &= \int_0^T [A_1^2 \sin^2 \omega t + 2A_1 A_2 \sin \omega t \times \sin(\omega t + \varphi) + \\ &\quad + A_2^2 \sin^2(\omega t + \varphi)] dt = \\ &= A_1^2 \int_0^T \sin^2 \omega t dt + 2A_1 A_2 \int_0^T \sin \omega t \times \sin(\omega t + \varphi) dt + \\ &\quad + A_2^2 \int_0^T \sin^2(\omega t + \varphi) dt. \end{aligned}$$

Учитывая аналитические выражения, представленные в [21], получим окончательное выражение энергии сигнала, которая будет пропорциональна сигналу на выходе приемника оптического излучения:

$$I(A_1, A_2, \varphi) = A_1^2 \left(\frac{T}{2} - \frac{1}{4\omega} \right) +$$

$$\begin{aligned} &+ 2A_1 A_2 \left[\left(\frac{T}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin \omega T \right) \cos \varphi - \frac{1}{4\omega} \cos \omega T \sin \varphi \right] + \\ &+ A_2^2 \left[\left(\frac{T}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin \omega T \right) \cos^2 \varphi - \frac{1}{4\omega} \cos 2\omega T \sin 2\varphi + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{T}{2} + \frac{1}{4\omega} \sin 2\omega T \right) \sin^2 \varphi \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Для интервала интегрирования от 0 до nT выражение (2) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} I(A_1, A_2, \varphi) &= A_1^2 \left(\frac{nT}{2} - \frac{1}{4\omega} \right) + \\ &+ 2A_1 A_2 \left[\left(\frac{nT}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin n\omega T \right) \cos \varphi - \frac{1}{4\omega} \cos n\omega T \sin \varphi \right] + \\ &+ A_2^2 \left[\left(\frac{nT}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin n\omega T \right) \cos^2 \varphi - \frac{1}{4\omega} \cos 2n\omega T \sin 2\varphi + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{nT}{2} + \frac{1}{4\omega} \sin 2n\omega T \right) \sin^2 \varphi \right]. \end{aligned}$$

Расчет выходного сигнала ПОИ при последовательном включении электрооптических модуляторов

Для схемы радиофотонного устройства с последовательно включенными ЭОМ Маха–Цендера (рис. 2) на основании системы уравнений (1) представим сигналы на выходах ЭОМ системой алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} M_1 &= A_1 A_2 \sin(\omega t + \varphi_1) \sin(\omega t + \varphi_2), \\ M_2 &= A_1 A_3 \sin(\omega t + \varphi_1) \sin(\omega t + \varphi_3), \\ &\dots \\ M_n &= A_1 A_n \sin(\omega t + \varphi_1) \sin(\omega t + \varphi_n). \end{aligned} \quad (3)$$

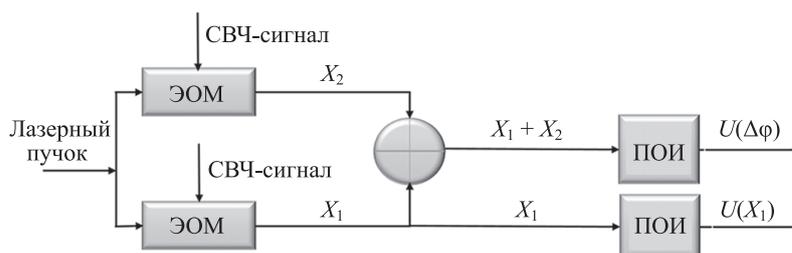


Рис. 1. Схема приема сигналов с параллельным включением электрооптических модуляторов Маха–Цендера
Fig. 1. Signal receiving circuit with parallel connection of electro-optical Mach–Zehnder modulators

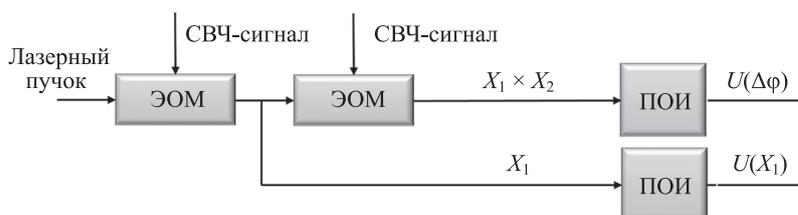


Рис. 2. Схема приема сигналов с последовательным включением электрооптических модуляторов Маха–Цендера
Fig. 2. Signal receiving circuit with series connection of electro-optical Mach–Zehnder modulators

Сигналы на выходах ПОИ на основании системы уравнений (3) представим системой интегральных уравнений:

$$P_1 = \int_0^{nT} A_1 A_2 \sin(\omega t + \varphi_1) \sin(\omega t + \varphi_2) dt,$$

$$P_2 = \int_0^{nT} A_1 A_3 \sin(\omega t + \varphi_1) \sin(\omega t + \varphi_3) dt,$$

...

$$P_n = \int_0^{nT} A_1 A_n \sin(\omega t + \varphi_1) \sin(\omega t + \varphi_n) dt.$$

В общем виде для $(n-m)$ -го и $(n-k)$ -го элементов ФАР получим следующее выражение:

$$P_{mk} = \int_0^{nT} A_{n-m} A_{n-k} \sin(\omega t + \varphi_{n-m}) \sin(\omega t + \varphi_{n-k}) dt,$$

где $m \neq k$.

Применив преобразование произведения синусов двух углов в разность косинусов суммы и разности этих углов, получим:

$$P_{mk} = A_{n-m} A_{n-k} \int_0^{nT} \frac{1}{2} [\cos(\omega t + \varphi_{n-m} - \omega t - \varphi_{n-k}) - \cos(\omega t + \varphi_{n-m} + \omega t + \varphi_{n-k})] dt.$$

Получим в общем виде формулу для расчета мощности выходного сигнала ПОИ:

$$P_{mk} = 0,5 A_{n-m} A_{n-k} \cos(\varphi_{n-m} - \varphi_{n-k}). \quad (4)$$

Если представить мощность сигнала P_{mk} как квадрат амплитуды $u^2(\Delta\varphi)$, то для схемы радиофотонного устройства с последовательно включенными ЭОМ будет справедливо выражение квадрата амплитуды сигнала на выходе ПОИ.

Таким образом, выражение (4) представим в виде:

$$u^2(\Delta\varphi) = 0,5 A_{n-m} A_{n-k} \cos(\varphi_{n-m} - \varphi_{n-k}). \quad (5)$$

Откуда разность фаз можно выразить на основе следующего выражения:

$$\varphi_{n-m} - \varphi_{n-k} = \arccos\left(\frac{2u^2(\Delta\varphi)}{A_{n-m} A_{n-k}}\right).$$

Анализ существующих радиофотонных схем показал, что ни в радиолокации, ни в радиосвязи не используется последовательное соединение ЭОМ, которое позволяет повысить точность определения разности фаз выходных сигналов приемных элементов ФАР [1–6].

Оценка погрешностей измерений разности фаз приемных элементов ФАР

Оценим в сравнении погрешности измерений значений фаз сигналов приемных элементов ФАР на выходе ЭОМ.

При параллельном соединении ЭОМ суммарная абсолютная погрешность $\Delta\varphi_\Sigma$ измерения разности фаз, например, двух первых сигналов системы уравнений (1), суммируемых на выходе ЭОМ, определяется как корень квадратный из суммы квадратов абсолютных

погрешностей $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$, вносимых ЭОМ в каждый из сигналов U_1 и U_2 :

$$\Delta\varphi_\Sigma = \sqrt{(\Delta\varphi_1)^2 + (\Delta\varphi_2)^2}.$$

На основании равенства погрешностей $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi$, получим

$$\Delta\varphi_\Sigma = \sqrt{2} \Delta\varphi. \quad (6)$$

При последовательном соединении ЭОМ суммарная абсолютная погрешность $\Delta\varphi_\Sigma$ измерения разности фаз двух первых сигналов системы уравнений (1), с учетом прохождения сигналом U_2 двух последовательно соединенных ЭОМ, будет равна:

$$\Delta\varphi_\Sigma = \sqrt{(\Delta\varphi)^2 + (2\Delta\varphi)^2} = \sqrt{5} \Delta\varphi. \quad (7)$$

Из сравнения погрешностей (6) и (7) следует, что во втором случае погрешность измерения разности фаз в 1,58 раза выше.

Техническая реализация метода определения разности фаз выходных сигналов приемных элементов ФАР на примере радиофотонного фазового пеленгатора

Известные фазовые методы определения характеристик, применяемые в пеленгации, радиолокации и радионавигации, основаны на использовании n приемных антенн, n коммутаторов и n фазовращателей [8, 9]. Данные методы дают низкую точность измерения фазы сигнала источника, что обусловлено высокими погрешностями фазовращателей и нестабильностью передаточных характеристик фазосдвигающих элементов.

Задача повышения точности определения фазы между элементами ФАР может быть решена за счет того, что в фазовый пеленгатор введены: лазер, n модуляторов Маха–Цендера, контроллер высокочастотных коммутаторов и ПОИ. При этом лазер связан с входом первого из n модуляторов Маха–Цендера, соединенных последовательно оптическим каналом. Выход n -го модулятора Маха–Цендера связан с входом ПОИ. Повышение точности определения фазы достигается за счет того, что принимаемый элементами ФАР сигнал, модулирующий лазерный пучок несущей частоты, переносится в оптический диапазон, устраняя тем самым погрешность, вносимую в процесс измерения фазы фазовращательными элементами и обусловленную неравномерностью амплитудно-частотной характеристики фазовращателя в рабочем частотном диапазоне пеленгатора [22].

Функциональная схема радиофотонного фазового пеленгатора представлена на рис. 3.

Радиофотонный фазовый пеленгатор работает следующим образом. Радиосигнал пеленгуемого источника принимается элементами ФАР 1 и многоканальным приемником 2. С выходов приемника 2 сигналы поступают на многоканальный коммутатор 3, управляемый вычислителем 7. Сигналы с выходов многоканального коммутатора 3 попарно и последовательно поступают на электрические входы оптических модуляторов 4. Лазерное излучение лазера 5 по оптоволоконному

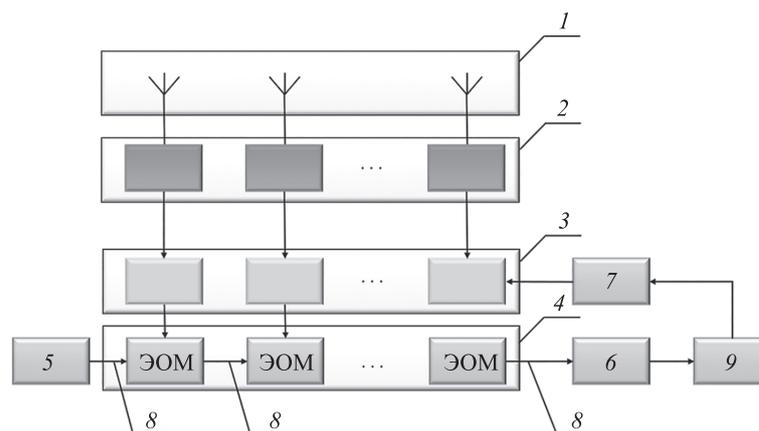


Рис. 3. Функциональная схема радиофотонного фазового пеленгатора

Fig. 3. Functional diagram of a radio-photon phase direction finder

каналу 8 поступает на оптический вход первого модулятора 4, с выхода которого — на второй, с него — на третий и так далее. С выхода n -го модулятора 4 сигнал поступает на ПОИ 6, с выхода которого на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) 9. Из АЦП 9 амплитуда сигнала в цифровой форме подается на вход вычислителя 7, в котором производится вычисление азимута и угла места пеленгуемого источника излучения. Сигналы двух любых антенных элементов 1 перемножаются в электрооптических модуляторах 4 и последовательно поступают на вход ПОИ 6. Из выхода ПОИ 6 сигнал, пропорциональный интегралу произведения выбранных сигналов (5), поступает на вход АЦП 9, а из него — в вычислитель 7, позволяющий определить направление (азимут и угол места) на источник излучения.

Заключение

Приведенные в работе выражения позволяют рассчитать выходной сигнал приемника оптического излучения и разности фаз выходных сигналов приемных элементов фазированной антенной решетки в радиофотонной схеме с параллельным и последовательным попарными соединениями электрооптических модуляторов.

Разработанные методы заключаются в более точном измерении разности фаз между принимаемыми сигналами, которое можно осуществить с помощью использования параллельного и последовательного включения электрооптических модуляторов в радиофотонных устройствах. При этом метод, основанный на определении разности фаз с помощью параллельного соединения электрооптических модуляторов, дает в 1,58 раза меньшую погрешность по сравнению с методом, базирующимся на определении разности фаз с помощью последовательного соединения электрооптических модуляторов. Кроме того, данный метод характеризуется меньшей скоростью передачи и меньшей амплитудой сигнала в результате прохождения лазерным пучком несущей частоты двух последовательно включенных электрооптических модуляторов.

Предложенная радиофотонная схема фазового пеленгатора обеспечивает высокую точность измерений разности фаз выходных сигналов отдельных приемных элементов фазированной антенной решетки за счет исключения погрешности, вносимой в процесс измерения фазы фазовращательными элементами и обусловленной неравномерностью амплитудно-частотной характеристики фазовращателя в рабочем частотном диапазоне пеленгатора.

Литература

1. Дамдинова Д.Б., Поletaев А.С., Ченский А.Г. Сравнение точности методов вычисления разности фаз квазигармонических сигналов // Вестник СибГУТИ. 2017. № 2 (38). С. 87–97.
2. 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. <https://doi.org/10.7868/S0033849415080100>
3. 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.
4. 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>

References

1. Damdinova D.B., Poletaev A.S., Chensky A.G. Accuracy comparison of methods for measuring a phase shift of quasi-harmonic signals. *Vestnik SibGUTI*, 2017, no. 2 (38), pp. 87–97. (in Russian)
2. Korotkov K.S., Frolov D.R., Levchenko A.S. Analysis of the methods for measuring the true phase shift of microwave mixers. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2015, vol. 60, no. 8, pp. 936–942. <https://doi.org/10.1134/s1064226915080100>
3. Ovchinnikov F.V., Sukhotin V.V. Measurement of a difference phases of signals in satellite communication systems with use of one geostationary artificial earth satellite. *The Research of the Science City*, 2017, vol. 1, no. 1(19), pp. 30–37. (in Russian)
4. Gusenitsa Y.N., Snegirev A.L., Pokotilo S.A. Study of the characteristics of a radio-photon device for determining the phase differential of radar signals. *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 2, pp. 119–123. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01905-5>

5. Гусеница Я.Н., Снегирев А.Л., Покотило С.А. Устройство определения фазы радиолокационного сигнала. Патент RU2751097C2. Бюл. 2021. № 19.
6. Малыгин А.Н., Прасько 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.
7. Афанасьев В.М. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха-Цендера // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 4. С. 341–369.
8. Белоусов А.А. Особенности проектирования многоканальных СВЧ устройств миллиметрового диапазона // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2. № 4. С. 522–527.
9. Белоусов А.А., Вольхин Ю.Н., Гамиловская А.В., Дубровская А.А. Реализация радиопотонных трактов приемных СВЧ устройств // Состояние и перспективы развития науки и техники по направлению «Информатика и вычислительная техника»: сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции. Т. 3. Анапа: Военный инновационный технополис «ЭРА», 2020. С. 52–59.
10. Вольхин Ю.Н., Тихонов Е.В. Обзор возможных способов реализации радиопотонных АЦП диапазона СВЧ // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы V юбилейной общероссийской научно-технической конференции. Омск: Омский государственный технический университет, 2014. С. 87–104.
11. Бирюков В.В., Грачев В.А., Лобин С.Г., Палачев М.А., Раевский А.С. Реализация устройств генерации и преобразования сигналов СВЧ-диапазона методами радиопотоники // Антенны. 2017. № 11(243). С. 63–70.
12. Конторов С.М., Шипулин А.В., Кюпперс Ф., Валуев В.В. Многоканальный радиопотонный приемный тракт // Фотоника. 2019. Т. 13. № 6. С. 584–593. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.6.584.593>
13. Морозов О.Г., Ильин Г.И., Морозов Г.А. Системы радиопотоники с последовательным амплитудно-фазовым преобразованием оптической несущей // Фотон-экспресс. 2017. № 6(142). С. 104–105.
14. Чиров Д.С., Кочетков Ю.А. Применение технологий радиопотоники в интересах формирования и обработки широкополосных радиолокационных сигналов // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2020. Т. 10. № 1. С. 15–24.
15. Cox C.H., Ackerman E.I. A path to realizing high-performance 100-GHz analog links // Proc. of the 2013 IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP). 2013. P. 39–40. <https://doi.org/10.1109/AVFOP.2013.6661612>
16. Hervás J., Ricchiuti A.L., Li W., Zhu N.H., Fernández-Pousa C.R., Sales S., Li M., Capmany J. Microwave photonics for optical sensors // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2017. V. 23. N 2. P. 5602013. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2017.2651117>
17. Kontorov S.M., Cherepenin V.A., Kulagin V.V., Prokhorov D.A., Shulunov A.N., Kargin N.I., Valuev V.V. Signal spectral-interval estimation in fast photonic analog-to-digital converters // Progress in Electromagnetics Research Symposium. 2018. P. 967–972. <https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8598200>
18. Pan S., Yao J. Photonics-based broadband microwave measurement // Journal of Lightwave Technology. 2017. V. 35. N 16. P. 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. Investigation of the characteristics of fiber optic delay lines with different types of optical emission intensity modulation // Proceedings of SPIE. 2017. V. 10342. P. 103420K. <https://doi.org/10.1117/12.2270386>
20. Yao J. Microwave photonics: Optical generation and processing of microwave signals // Proc. of the 2008 International Conference on Advanced Infocomm Technology, ICAIT'08. 2008. p. 135. <https://doi.org/10.1145/1509315.1509450>
21. Ахияров В.В., Нефедов С.И., Николаев А.И., Слукин Г.П., Федоров И.Б., Шустиков В.Ю. Радиолокационные системы. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 352 с.
22. Гусеница Я.Н., Снегирев А.Л., Покотило С.А., Осадчий Д.В., Андреев Д.Е. Радиопотонный фазовый пеленгатор. Патент RU2736543C1. Бюл. 2020. № 32.
5. Gusenitsa Y.N., Snegirev A.L., Pokotilo S.A. Method of determining radar signal phase. Патент RU2751097C2, 2021. (in Russian)
6. Malygin A.N., Prasko A.D., Trotsenko I.V. The evaluation of the difference of the amplitudes, frequencies and phases of sinusoidal electric vibrations. *Izvestiya Tula State University*, 2020, no. 2, pp. 533–538. (in Russian)
7. Afanas'ev V.M. The electro-optical modulator according to the scheme of the interferometer of Mach-Zehnder. *Applied Photonics*, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 341–369. (in Russian)
8. Belousov A.A. Design features of multi-channel millimeter-wave microwave devices. *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 522–527. (in Russian)
9. Belousov A.A., Volkhin Iu.N., Gamilovskaia A.V., Dubrovskaja A.A. Implementation of radiophoton tracts of receiving microwave devices. *Proc. of the second All-Russian scientific and technical conference "State and prospects for science and technology" in the scope of "Informatics and computer technology"*. Vol. 3. Anapa, Technopolis ERA, 2020, pp. 52–59. (in Russian)
10. Volkhin Iu.N., Tikhonov E.V. A survey of possible ways to implement radiophoton ADCs in the microwave range. *Proc. of the 5th anniversary all-Russian scientific and technical conference "Exchange of experience for creating ultra-wideband radio-electronic systems"*. Omsk, Omsk State Technical University, 2014, pp. 87–104. (in Russian)
11. Biryukov V.V., Grachev V.A., Lobin S.G., Palachev M.A., Raevskij A.S. Implementation of devices for microwave signal generating and converting by the radiophotonics methods. *Antennas*, 2017, no. 11(243), pp. 63–70. (in Russian)
12. Kontorov S.M., Shipulin A.V., Kuppers F., Valuev V.V. Multi-channel radio photon receiving path. *Photonics Russia*, 2019, vol. 13, no. 6, pp. 584–593. (in Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.6.584.593>
13. Morozov O.G., Ilin G.I., Morozov G.A. Radiophotonics systems with sequential amplitude-phase modulation of optical carrier. *Foton-Express*, 2017, no. 6(142), pp. 104–105. (in Russian)
14. Chirov D.S., Kochetkov Iu.A. Application of radiophotonics technologies for the formation and processing of wideband radar signals. *Digital Signal Processing*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 15–24. (in Russian)
15. Cox C.H., Ackerman E.I. A path to realizing high-performance 100-GHz analog links. *Proc. of the 2013 IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP)*, 2013, pp. 39–40. <https://doi.org/10.1109/AVFOP.2013.6661612>
16. Hervás J., Ricchiuti A.L., Li W., Zhu N.H., Fernández-Pousa C.R., Sales S., Li M., Capmany J. Microwave photonics for optical sensors. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 5602013. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2017.2651117>
17. Kontorov S.M., Cherepenin V.A., Kulagin V.V., Prokhorov D.A., Shulunov A.N., Kargin N.I., Valuev V.V. Signal spectral-interval estimation in fast photonic analog-to-digital converters // Progress in Electromagnetics Research Symposium. 2018. P. 967–972. <https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8598200>
18. Pan S., Yao J. Photonics-based broadband microwave measurement. *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. Investigation of the characteristics of fiber optic delay lines with different types of optical emission intensity modulation. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10342, pp. 103420K. <https://doi.org/10.1117/12.2270386>
20. Yao J. Microwave photonics: Optical generation and processing of microwave signals. *Proc. of the 2008 International Conference on Advanced Infocomm Technology, ICAIT'08*, 2008, pp. 135. <https://doi.org/10.1145/1509315.1509450>
21. Akhiiarov V.V., Nefedov S.I., Nikolaev A.I., Slukin G.P., Fedorov I.B., Shustikov V.Iu. *Radar Systems*. Moscow, Bauman University Publ., 2016, 352 p. (in Russian)
22. Gusenitsa Y.N., Snegirev A.L., Pokotilo S.A., Osadchij D.V., Andreev D.E. Radio-photonic phase direction finder. *Patent RU2736543C1*, 2020. (in Russian)

Авторы

Гусеница Ярослав Николаевич — кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела, Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, 353456, Российская Федерация, [sc 57221312214](https://orcid.org/0000-0003-4757-5066), <https://orcid.org/0000-0003-4757-5066>, yaromir226@gmail.com

Морозов Андрей Владимирович — доктор технических наук, профессор, заместитель начальника технополиса, Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, 353456, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-5003-8718>, era_1@mil.ru

Покотило Сергей Александрович — доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, 353456, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5401-8615>, era_1@mil.ru

Снегирев Александр Леонтьевич — инженер, Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, 353456, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-9908-9492>, era_1@mil.ru

Authors

Yaroslav N. Gusenitsa — PhD, Head of the Research Department, Military innovative technopolis “ERA”, Anapa, 353456, Russian Federation, [sc 57221312214](https://orcid.org/0000-0003-4757-5066), <https://orcid.org/0000-0003-4757-5066>, yaromir226@gmail.com

Andrey V. Morozov — D.Sc., Professor, Deputy Head of Technopolis, Military innovative technopolis “ERA”, Anapa, 353456, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5003-8718>, era_1@mil.ru

Sergey A. Pokotilo — D.Sc., Associate Professor, Senior Researcher, Military innovative technopolis “ERA”, Anapa, 353456, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5401-8615>, era_1@mil.ru

Alexandr L. Snegirev — Engineer, Military innovative technopolis “ERA”, Anapa, 353456, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9908-9492>, era_1@mil.ru

*Статья поступила в редакцию 16.08.2021
Одобрена после рецензирования 21.10.2021
Принята к печати 30.11.2021*

*Received 16.08.2021
Approved after reviewing 21.10.2021
Accepted 30.11.2021*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»