

РАЗРАБОТКА МАКЕТА ФАЗОВОГО ПЕЛЕНГАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ РАДИОФОТОНИКИ

К. Б. Мартиросов

АО «ВНИИ «Градиент»

Российская Федерация, 344000, г. Ростов-на-Дону, Проспект Соколова, 96

Аннотация. В работе предложена методика определения пеленга на источник радиоизлучения с использованием двухэлементной антенной решетки. Особенностью схемы является использование двух каналов, каждый из которых включает в себя двухпортовый модулятор Маха-Цендера, оптический полосовой фильтр и фотодетектор. Отношение амплитуд сигналов на выходах каналов пропорционально разности фаз сигналов, принятых элементами решетки и не зависит от амплитуды входного сигнала.

Ключевые слова: радиофотоника; радиолокация; фазовый пеленг; модулятор Маха-Цендера; двухпортовый модулятор; интегральные фотонные схемы.

В настоящее время устоялось мнение, что радиофотоника является мощным инструментом для обработки микроволновых сигналов. За годы развития, технологии радиофотоники нашли свое применение при решении различных задач [1,2]: формирование диаграмм направленности (ДН) антенн, синтез фотонных фильтров и генерация произвольных по форме микроволновых сигналов, создание сверхбыстродействующих фотонных аналого-цифровых преобразователей, полностью оптическое измерение мгновенной частоты и амплитуды микроволновых сигналов при пассивной локации и др. В частности, для решения задач измерения мгновенной частоты сигнала хорошо зарекомендовало себя использование тандемных амплитудно-фазовых модуляторов (ТАФМ) [3, 4] при обработке одного микроволнового сигнала и частотных гребенок на базе ТАФМ [5, 6] при обработке множества сигналов с использованием измерительного преобразования «частота-амплитуда» в волоконных брэгговских решетках [7, 8]. В результате исследований [3-8] был предложен, разработан и экспериментально исследован метод измерения частоты множества микроволновых сигналов на основе применения ТАФМ в диапазоне от 2 до 24 ГГц с шириной канала измерений 2 ГГц и достигнутой погрешностью измерения менее чем 1 МГц в реальном масштабе времени. Другая задача, которая может быть решена посредством использования технологии радиофотоники при построении РЛС – оценка фазового пеленга (ФП) на цель или, иными словами, угла прихода отраженного от объекта СВЧ сигнала.

Определение ФП происходит следующим образом. В фазированных антенных решетках в режиме приема входящий сигнал, отраженный от объекта, поступает на каждый антенный элемент с разным временем задержки τ в зависимости от угла φ между источником сигнала и антенной решеткой из-за пространственного разнесения d между антенными элементами, следовательно, измерение τ при скорости света в вакууме c позволяет оценить ФП отраженного от объекта сигнала. Сама оценка пеленга обычно выполняется с помощью методов цифровой обработки сигналов [9]. Очевидно, что цифровая обработка широкополосных СВЧ сигналов радиоэлектронными методами затруднена из-за ограничений полосы пропускания существующих цифровых сигнальных процессоров. Поэтому были предложены оптические реализации измерителей ФП [10-12]. Однако эти предложения либо довольно сложны конструктивно, либо требуют сложных

систем обработки сигналов на промежуточной частоте, что ограничивает их широкополосность.

Простой вариант устройства измерения ФП представлен в [13]. Непрерывное излучение лазера попадает в блок электрооптических модуляторов на основе параллельного двухпортового модулятора Маха-Цендера. Отраженный сигнал на частоте f_s принимается двумя антеннами, которые подключены к двум входным радиочастотным портам модулятора. Плечи двухпортового модулятора смещены в нулевую рабочую точку, что позволяет частично подавить неинформативную компоненту несущей лазерного излучения f_c и получить двухчастотное излучение $f_c \pm f_s$ с разностной частотой $2 f_s$. Амплитуда компонент, соответствующих отраженному сигналу, на частотах $f_c \pm f_s$ зависит от τ через разность фаз сигналов на двух входных радиочастотных портах модулятора и позволяет определить ФП. Частота и мощность выходных сигналов измерителя ФП могут быть измерены с помощью электронных анализаторов спектра.

К недостаткам вышеописанного и некоторых других методов [14-15] относится зависимость выходного сигнала не только от разности фаз между сигналами, но и от мощности принятого сигнала. Методика, позволяющая избежать данного недостатка предложена в работе [16]. Рассмотрим схему фазового пеленгатора, показанную на рисунке 1.

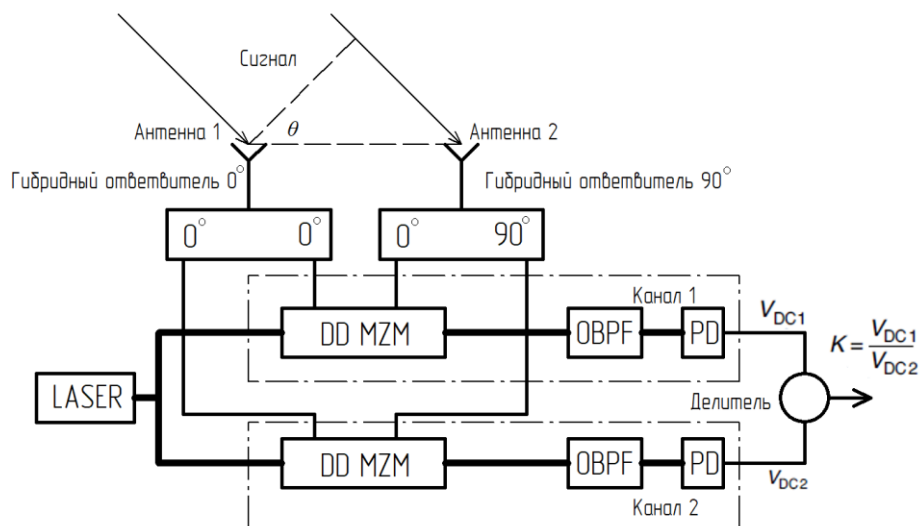


Рис. 1. Схема фазового пеленгатора

Таким образом, на управляющие входы модулятора в канале 1 сигналы, принятые двумя антеннами, подаются без изменения, а на модулятор в канале 2 сигнал с антенны 1 подается напрямую, а сигнал с антенны 2 предварительно доворачивается на 90° . Модуляторы DDMZM работают в квадратурной рабочей точке. Оптический полосовой фильтр ОВФФ на выходе модулятора подбирается таким образом, чтобы пропускать один из продуктов первого порядка и подавлять несущую и продукты более высоких порядков. Значение электрического поля на выходе ОВФФ определяется как

$$E_{\text{out}}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{\text{in}} \sqrt{(t_{ff})} e^{j\omega_c t} J_1(\beta_{RF}) [e^{j\sin(\omega_{RF} t)} + e^{j\sin(\omega_{RF} t + \varphi + \gamma)}] \quad (1)$$

где E_{in} – амплитуда электрического поля оптического излучения на входе DDMZM, t_{ff} это потери в DDMZM, ω_c — частота несущей оптического излучения, ω_{RF} – частота

несущей радиосигнала, $J_1(x)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка, $\beta_{RF} = \pi V_{RF}/V_\pi$ – глубина модуляции, V_{RF} – амплитуда радиосигнала, V_π – полуволновое напряжение модулятора, γ равен 0° для модуля 1 и 90° для модуля 2, что соответствует повороту фазы в направленном ответвителе.

Продукт первого порядка, прошедший через ОБПФ, попадает на низкочастотный фотодетектор, который генерирует постоянный фототок. Напряжения на выходах фотодетекторов модулей 1 и 2 определяются как

$$V_{DC1} = RP_{in}t_{ff}J_1^2(\beta_{RF})[1 + \cos(\varphi)]R_0 \quad (2)$$

$$V_{DC2} = RP_{in}t_{ff}J_1^2(\beta_{RF})[1 + \sin(\varphi)]R_0 \quad (3)$$

где R – чувствительность фотодетектора, P_{in} – мощность оптического излучения, R_0 – сопротивление нагрузки фотодетектора. Отношение между напряжениями на выходах модулей определяется как

$$K = \frac{V_{DC1}}{V_{DC2}} = \frac{1 + \cos(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)} \quad (4)$$

Как следует из (4), K является функцией угла φ , и соответственно угла падения волны θ , и при этом не зависит амплитуды радиосигнала на выходе антенны.

Для оценки работы данной схемы было проведено моделирование в среде OptiSystem 7.0. Модель состоит из следующих элементов: источник оптического излучения, источник радиосигнала, двухпортовый модулятор Маха-Цендера, оптический полосовой фильтр, фотодетектор, фильтр низкой частоты, фазовращатели. Результат моделирования представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Зависимость квадрата отношения мощностей сигналов на выходах фотодетекторов в каналах 1 и 2 K от сдвига фаз между сигналами на входах модуляторов

Как следует из рисунка, зависимость является нелинейной, с более высокой чувствительностью в области отрицательных углов.

В рамках проверки теоретических результатов было проведено экспериментальное исследование разработанной схемы. Структурная схема макета и внешний вид представлены на рисунках 3 а,б.

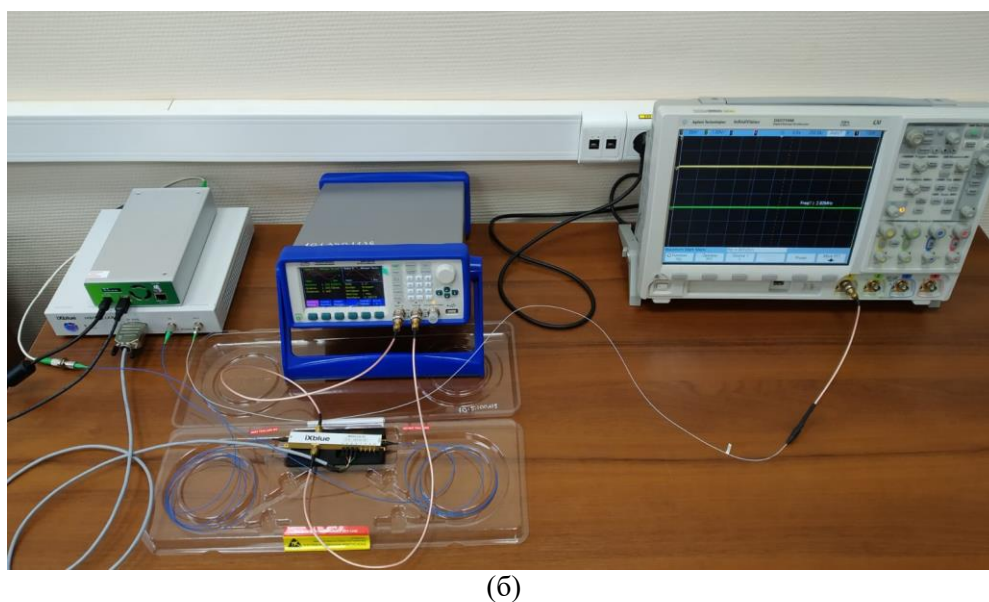
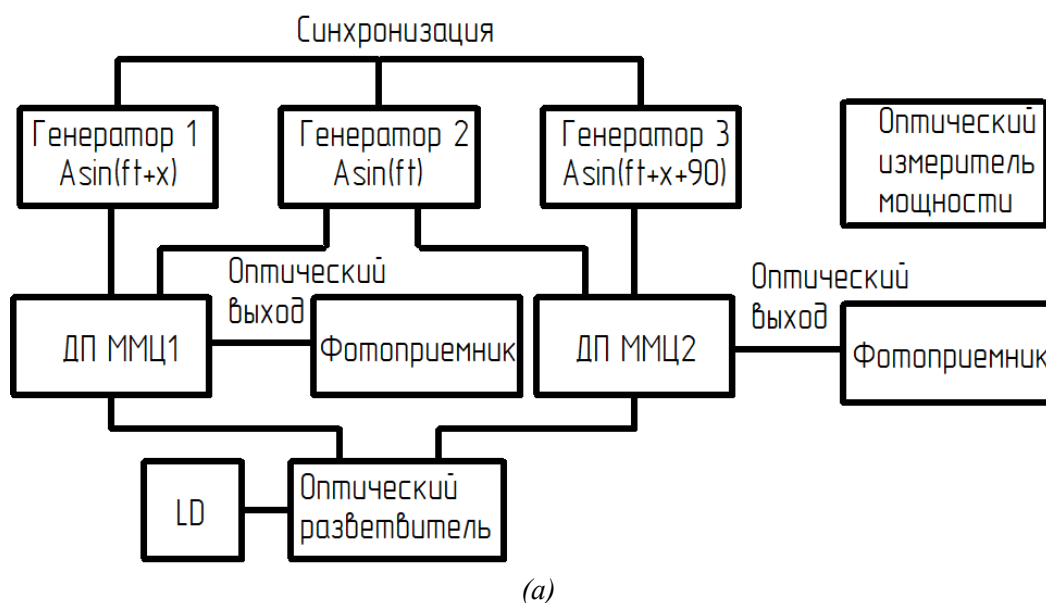


Рис. 3. Структурная схема (а) и внешний вид (б) макета

Для упрощения процедуры измерения каналы исследовались по отдельности, а модулирующие напряжения подавались с одного двухканального генератора.

Использовалось следующее оборудование:

- двухканальный генератор АКИП-3407/5А, вид сигнала – гармонический, частота 60МГц, мощность 10 дБм;
- перестраиваемый лазер Laser MatriQ, длина волны – 1550 нм, мощность – 10 дБм, спектральная ширина линии излучения – 100 кГц;
- двухпортовый электрооптический модулятор iXBlue MXIQ-LN-30, в качестве контроллера рабочей точки использовался MBC-IQ-LAB (рабочая точка – квадратурная);
- фотоприемник InGaAs, полоса 0...1 ГГц;
- осциллограф Agilent DSO7184B;
- измеритель оптической мощности FOD1204.

В ходе эксперимента была получена зависимость отношения оптической мощности на выходах модуляторов 1 и 2 к сдвигу фаз между сигналами на входах модуляторов (рисунок 4). Полученная зависимости хорошо коррелируют с рассчитанной на основе компьютерной модели (рисунок 5).

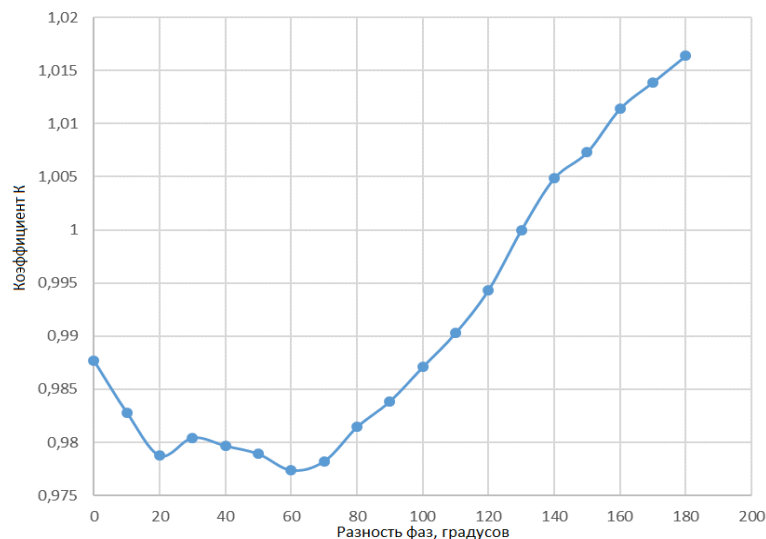


Рис. 4. Зависимость отношения оптической мощности на выходах модуляторов 1 и 2 к сдвигу фаз между сигналами на входах модуляторов

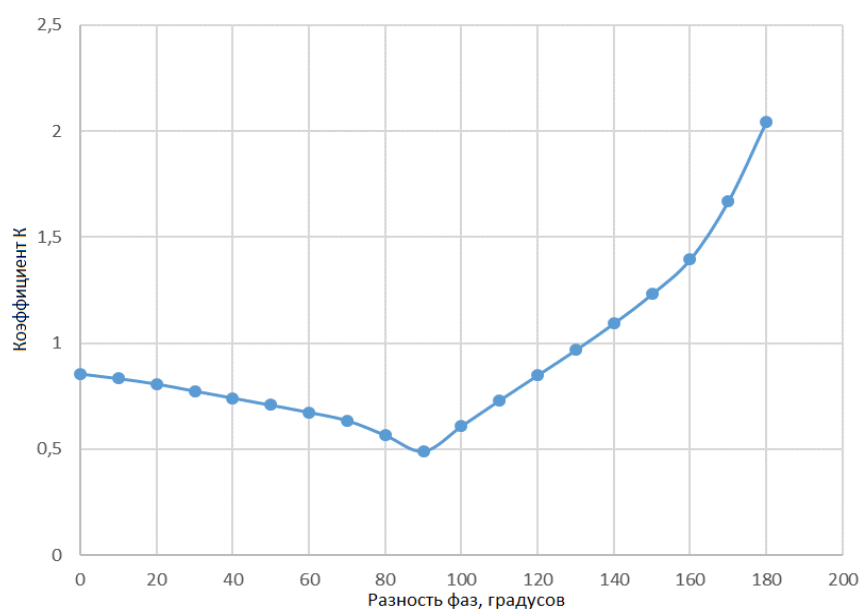


Рис. 5. Результаты моделирования зависимости отношения оптической мощности на выходах модуляторов 1 и 2 к сдвигу фаз между сигналами на входах модуляторов

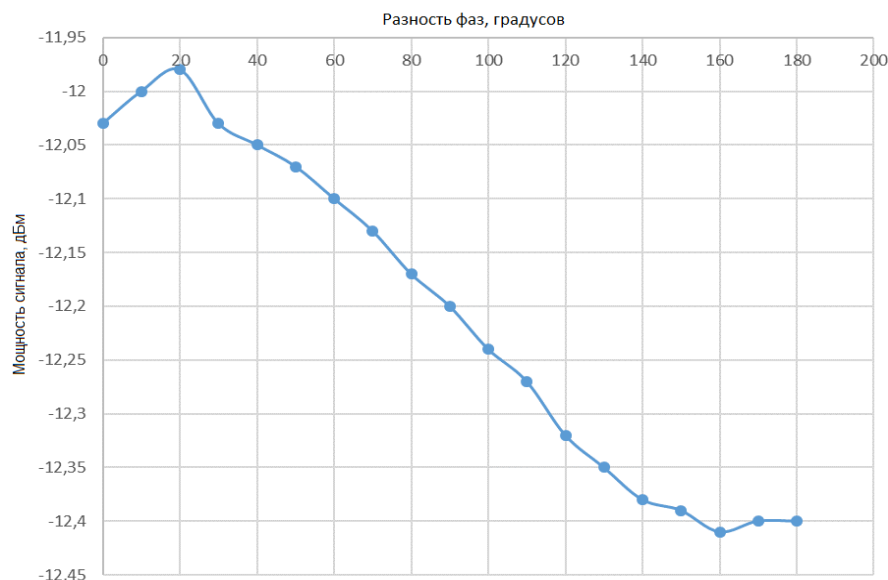


Рис. 6. Зависимость мощности сигнала на выходе модулятора 1 от сдвига фаз между сигналами на входах модуляторов

Аналогичные зависимости могут быть получены так же и при анализе сигнала с выхода фотоприемника. Следует отметить, что результирующие кривые (рисунки 4 и 5) имеют немонотонный характер, в результате этого возникает неоднозначность при определении разности фаз входных сигналов. Данное обстоятельство может быть учтено путем анализа мощности сигнала на выходе модулятора 1 (рисунок 6).

Отличие полученных экспериментальных результатов от результатов моделирования вызвано отсутствием оптического полосового фильтра, предназначенного для пропускания с выхода модулятора положительного продукта первого порядка, несущего информацию о разности фаз входных сигналов, и подавления несущей и остальных продуктов. В результате, при измерении оптической мощности полезный сигнал оказывается сильно зашумлен.

Заключение

Моделирование в среде OptiSystem и экспериментальная апробация полученной модели подтвердили возможность использования схемы для определения разности фаз сигналов, принятых элементами антенной решетки. Некоторые отличия в результатах моделирования и полученных экспериментальных результатах обусловлены вынужденным упрощением экспериментального макета. Таким образом, мы можем сделать вывод о перспективности использования технологий радиофотоники и в частности, предложенной схемы, для решения задачи фазовой пеленгации радиосигналов.

Список литературы

1. Морозов О.Г. Радиофотонный метод определения угла прихода отраженного радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции/ О.Г. Морозов, Г.А. Морозов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2021. - № 1(49). -С. 50-62.
2. Pan S. Microwave Photonic Radars/ S. Pan, Y. Zhang // Journal of Lightwave Technology.- 2020. - Vol. 38(19). - P. 5450-5484.

3. Il'in G.I. Theory of symmetrical two-frequency signals and key aspects of its application / G.I. Il'in, O.G. Morozov and A.G. Il'in // Proc. of SPIE. - 2014. - Vol. 9156. - P. 91560M.
4. Morozov O.G. External amplitude-phase modulation of laser radiation for generation of microwave frequency carriers and optical poly-harmonic signals: an overview / O.G. Morozov, G.I. Il'in, G.A. Morozov et al. // Proc. of SPIE. - 2016. - Vol. 9807. - P. 980711.
5. Морозов О.Г. Измерение мгновенной частоты микроволновых сигналов с использованием тандемной амплитудно-фазовой модуляции в оптическом диапазоне/ О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов и др. // Фотон-экспресс. - 2019. - № 5 (157). - С. 16-24.
6. Батыршин И.И. Анализ погрешности измерения мгновенной частоты СВЧ-сигналов в бриллюэновских радиофотонных системах / И.И. Батыршин, О.Г. Морозов, А.А. Иванов и др. // Научно-технический вестник Поволжья. - 2018. - № 5. - С. 102-104.
7. Ivanov A.A. Multiple frequencies analysis in tasks of FBG based instantaneous frequency measurements / A.A. Ivanov, A.J. Sakhabutdinov, O.G. Morozov et al. // Proc. of SPIE. - 2018. - Vol. 10774. - P. 107740Y.
8. Ivanov A.A. Microwave photonic system for instantaneous frequency measurement based on principles of "frequency-amplitude" conversion in fiber Bragg grating and additional frequency separation / A.A. Ivanov, O.G. Morozov, V.A. Andreev et al. // Proc. of SPIE. - 2017. - Vol. 10342. - P. 103421A.
9. Kang B. 6–40 GHz photonic microwave Doppler frequency shift measurement based on polarization multiplexing modulation and I/Q balanced detection / B. Kang, Y. Fan, W. Wang et al. // Opt. Commun. - 2020. - Vol. 456. - P. 124579.
10. Biernacki P.D., Ward A., Nichols L.T., and Esman R.D. Microwave phase detection for angle of arrival detection using a 4-channel optical downconverter / P.D. Biernacki, A. Ward, L.T. Nichols et al. // International Topical Meeting on Microwave Photonics. - 1998. - P. 137–140.
11. Zou X. Photonic approach to the measurement of time-difference-of-arrival and angle-of-arrival of a microwave signal / X. Zou, W. Li, W. Pan et al. // Opt. Lett. - 2012. - Vol. 37(4). - P. 755–757.
12. Cao Z. Angle-of-arrival measurement of a microwave signal using parallel optical delay detector / Cao Z., van den Boom H.P.A., Lu R. et al. // IEEE Photonics Technol. Lett. - 2013. - Vol. 25(19). - P. 1932–1935.
13. Huang C. Simple photonics-based system for Doppler frequency shift and angle of arrival measurement / C. Huang, H. Chen, and E.H.W. Chan // Optics Express. - 2020. - Vol. 28(9). - P. 14028-14037.
14. Jarrahi, M. Wideband, low driving voltage traveling-wave Mach-Zehnder modulator for RF photonics / M. Jarrahi, T.H. Lee, D.A.B. Miller // IEEE Photonics Technology Letters. - 2008. - Vol. 20(7). - P. 517–519.
15. Zou, X. Photonics for microwave measurements / X. Zou, B. Lu, W. Pan et al. // Laser & Photonics Reviews. - 10 (5). - 2016. - 711–734.
16. Chen, H. Technique to eliminate RF signal amplitude dependence in AOA measurement / H. Chen, E.H.W. Chan // Electronics Letters, 5th March 2020. - Vol. 56. - No. 5. - P. 243–244.

DEVELOPMENT OF A LAYOUT OF A PHASE DIRECTION FINDER WITH THE APPLICATION OF RADIO PHOTONICS TECHNOLOGY

K. B. Martirosov

JSC VNII Gradient
96, Sokolov Avenue, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

Annotation. The paper proposes a method for determining the bearing to a radio emission source using a two-element antenna array. A feature of the scheme is the use of two channels, each of which includes a two-port Mach-Zehnder modulator, an optical band-pass filter, and a photodetector. The ratio of the amplitudes of the signals at the outputs of the channels is proportional to the phase difference of the signals received by the elements of the array and does not depend on the amplitude of the input signal.

Keywords: radio photonics; radar; phase bearing; Mach-Zander modulator; two-port modulator; integrated photonic circuits.

Статья представлена в редакцию 05 декабря 2022г.