ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
INSTRUMENT ENGINEERING

УДК 621.383
DOI: https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.50

РАДИОФОТОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ПРИХОДА ОТРАЖЁННОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА НА ОСНОВЕ ТАНДЕМНОЙ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ

О. Г. Морозов[1*], Г. А. Морозов[1], Г. И. Ильин[1], И. И. Нуреев[1], А. Ж. Сахабутдинов[1], И. Н. Ростокин[2], А. А. Иванов[1], А. А. Лустина[1], Е. П. Денисенко[1], П. Е. Денисенко[1], В. Д. Андреев[1]

[1]Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
Российская Федерация, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10
*E-mail: OGMorozov@kai.ru
[2]Муромский институт им. В.К. Зворыкина,
филиал Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых
Российская Федерация, 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23

В статье рассмотрен новый, радиофотонный подход для измерения угла прихода (УП) радиолокационного микроволнового сигнала, отражённого от движущегося объекта. Для его обработки в оптическом диапазоне используется блок электрооптических модуляторов, который в отличие от известных решений выполнен на тандемных однопортовых амплитудном и фазовом модуляторах. Измеритель имеет очень простую структуру и невысокую стоимость, характеризуется широким диапазоном рабочих частот в десятки ГГц и имеет высокую надёжность работы, обусловленную простой процедурой калибровки и контроля температурных режимов элементов, тем более, если он изготовлен на базе интегральных фотонных схем. Экспериментальные результаты показывают, что измерение УП в диапазоне от 0 до π/2 возможно с погрешностью менее ±1,7 мрад при определении мощности информативной компоненты на частоте отражённого сигнала с погрешностью ± 10^{-3}.

Ключевые слова: *радиофотоника; радиолокация; угол прихода; тандемный амплитудно-фазовый модулятор; преобразование одночастотного лазерного излучения в двухчастотное с полным подавлением исходной несущей; интегральные фотонные схемы.*

Введение. Радиофотоника является мощным инструментом для обработки микроволновых сигналов. В связи с развитием технологий интегральных фотонных схем реализация устройств радиофотоники становится ещё более привлекательной, многократно превосходящей по своим характеристикам электронные

© Морозов О. Г., Морозов Г. А., Ильин Г. И. и др. 2021.

Для цитирования: Морозов О. Г., Морозов Г. А., Ильин Г. И., Нуреев И. И., Сахабутдинов А. Ж., Ростокин И. Н., Иванов А. А., Лустина А. А., Денисенко Е. П., Денисенко П. Е., Андреев В. Д. Радиофотонный метод определения угла прихода отражённого радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 1 (49). С. 50-62. DOI: https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.50

варианты не только по полосе обрабатываемых сигналов, но и по конструктивной надёжности и температурной стабильности. Это способствовало развитию широкого спектра приложений устройств радиофотоники в радиолокации [1]: 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.

Одно из активно развивающихся приложений – разработка измерителей мгновенной частоты (ИМЧ) микроволновых сигналов [2]. Радиофотоника обеспечивает самые важные их преимущества, такие как широкая мгновенная ширина полосы пропускания, невосприимчивость к электромагнитным помехам в процессе измерительного преобразования, малый размер, лёгкий вес и др. В последнее время активное направление развития ИМЧ – использование тандемных амплитудно-фазовых модуляторов [3, 4] при обработке одного микроволнового сигнала и частотных гребёнок на базе ТАФМ [5, 6], при обработке множества сигналов с использованием измерительного преобразования «частота–амплитуда» в волоконных брэгговских решётках [7, 8]. В результате исследований [3–8] был предложен, разработан и экспериментально исследован ИМЧ множества микроволновых сигналов на основе применения ТАФМ. Проведены измерения ИМЧ как отдельных сигналов, так и их множества 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.

Ещё один интересный функционал радиолокационных систем (РЛС), близкий к ИМЧ, который также можно реализовать с использованием технологий радиофотоники, – это оценка направления или угла прихода, отражённого от объекта микроволнового сигнала. Информация об УП может быть использована для минимизации мощности сигнала помехи при максимальном увеличении мощности искомого сигнала и улучшения эффективности работы РЛС. В РЛС слежения УП отражённого сигнала должен быть определён для регулировки направления наведения ДН РЛС так, чтобы объект оставался в центре луча зондирования. Кроме того, определение УП необходимо для систем радиоэлектронной борьбы, систем широкополосной мобильной связи поколения 5G и др.

В фазированных антенных решётках (ФАР) в режиме приёма входящий сигнал, отражённый от объекта, поступает на каждый антенный элемент с разным временем задержки τ в зависимости от угла φ между источником сигнала и антенной решёткой из-за пространственного разнесения d между антенными элементами (рис.1).

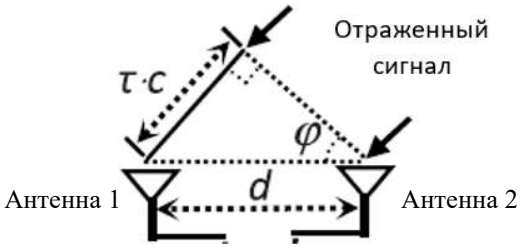


Рис. 1. Ситуационное положение элементов ФАР и фронта падающей волны микроволнового сигнала, отражённого от объекта
Fig. 1. Configuration of the phased array elements and the incident wavefront of signal reflected from the object

По относительной временной задержке между сигналами каждого антенного элемента можно вывести угол падения и, следовательно, направление на источник. Угол прихода определяется из:

$$\varphi = \sin^{-1}\left(c\tau/d\right). \quad (1)$$

Следовательно, измерение τ при скорости света в вакууме c позволяет оценить УП отражённого от объекта сигнала.

Оценка УП обычно выполняется с помощью методов цифровой обработки сигналов [9]. Однако цифровая обработка широкополосных микроволновых сигналов радиоэлектронными методами затруднена из-за ограничений полосы пропускания существующих цифровых сигнальных процессоров. Поэтому были предложены оптические реализации измерителей УП [10–12]. Однако эти предложения либо довольно сложны конструктивно, либо требуют сложных систем обработки сигналов на промежуточной частоте, что ограничивает их широкополосность.

Наиболее простая схема измерителя УП представлена в [13]. Непрерывное излучение лазера попадает в блок электрооптических модуляторов на основе параллельного двухпортового модулятора Маха-Цендера DD-MZM. Отражённый сигнал на частоте f_S принимается двумя антеннами, которые подключены к двум входным радиочастотным портам MZM1 и MZM2 внутри DD-MZM. DD-MZM через основной MZM 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 отражённому сигналу, на частотах $f_C \pm f_S$ зависит от τ через разность фаз сигнала на двух входных радиочастотных портах DD-MZM и позволяет определить УП. Частота и мощность выходного сигналов измерителя УП могут быть измерены с помощью электронных анализаторов спектра.

Основным достоинством данного измерителя является простота его реализации. Однако за такую простоту приходится платить достаточно высокой погрешностью измерений. DD-MZM, установленный в нулевой рабочей точке, не обеспечивает полного подавления несущей частоты лазера на выходе блока модуляторов, что приводит к погрешности определения УП за счёт появления вклада остаточной амплитуды несущей в амплитуду информативной составляющей, так и появлению биений на удвоенной информативной частоте.

Для устранения указанных недостатков в данной статье предложено строить схему блока модуляторов на основе ТАФМ, реализующих метод преобразования одночастотного когерентного излучения Ильина-Морозова с полным подавлением несущей [3].

Цель данной статьи – представить и экспериментально продемонстрировать новый радиофотонный измеритель для УП. Он основан на принципах построения последовательного радиофотонного звена, предложенного нами в [4], для построения оптоволоконных линий связи и сенсорных систем с использованием преимуществ ТАФМ. УП может быть определён по мощности выходного сигнала двух ТАФМ, измеренных электронным векторным анализатором цепей. Измеритель, в отличие от известных, не требует множества сложных оптических компонент, кроме лазера, блока оптических модуляторов и фотодетектора, так же, как и в прототипе, но позволяет существенно улучшить метрологические характеристики последнего [13]. Это простой, недорогой и мобильный измеритель, который подходит для использования как в системах повышения обороноспособности страны, так и в гражданских приложениях [14, 15]. Его преимущества могут стать более существенными при построении измерителя по технологиям интегральных фотонных схем.

1. Структурная схема измерителя и принцип его действия

Структурная схема. Измеритель УП имеет ту же структуру, что и классический волоконно-оптический канал связи и состоит из лазера, блока электрооптических модуляторов и фотоприёмника. Его структурная схема показана на рис. 2.

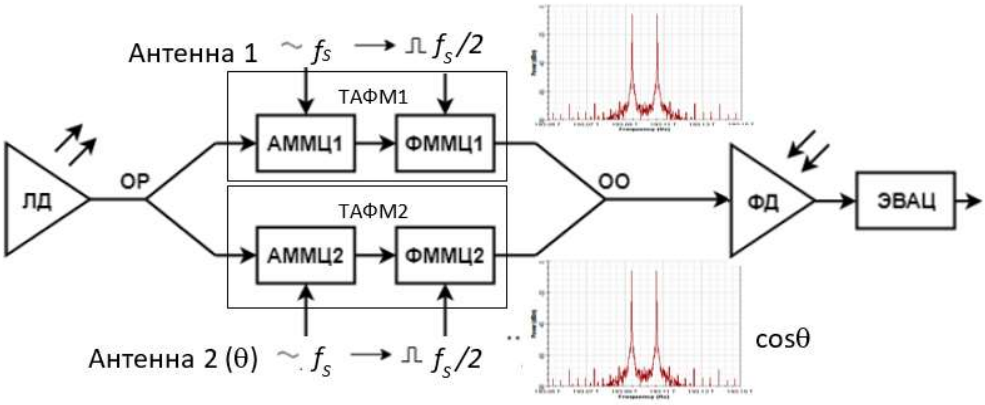
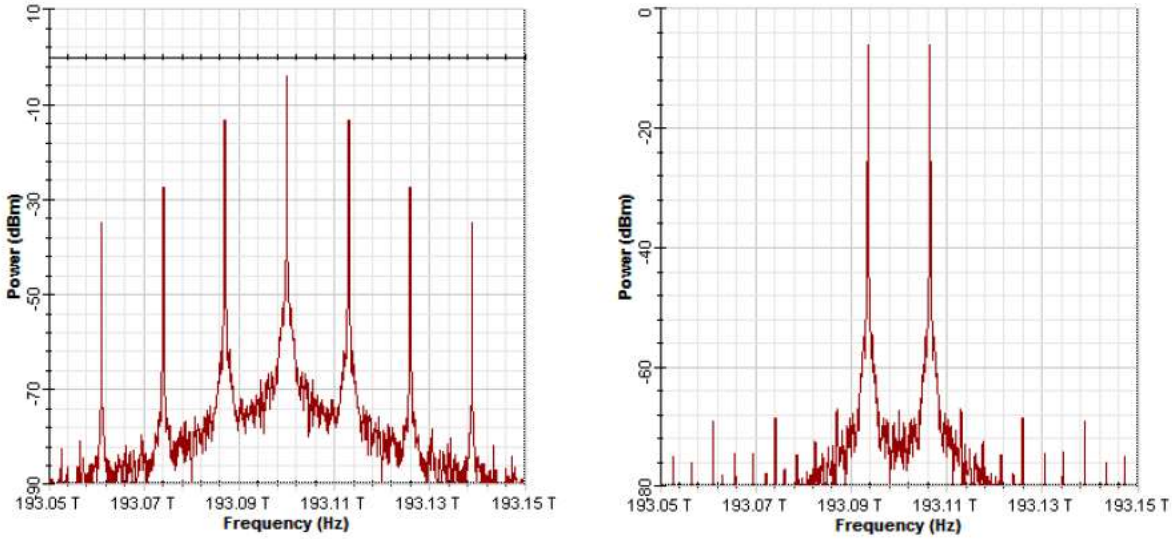


Рис. 2. Структурная схема измерителя УП:
ЛД – лазерный диод; ОР – оптический разветвитель; ОО – оптический объединитель;
ФД – фотодетектор; ЭВАЦ – электронный векторный анализатор цепей
Fig. 2. Block diagram of the AoA measuring tool: LD – laser diode; OS – optical splitter; OC – optical combiner; PD – photodetector; EVCA – electronic vector circuit analyzer

Блок электрооптических модуляторов в отличие от известных решений на DD-MZM построен на двух ТАФМ, состоящих из последовательно включённых амплитудного модулятора Маха-Цендера (АММЦ) и фазового (ФММЦ). Общая структура включения ТАФМ параллельная. На два параллельных ТАФМ1 и ТАФМ2, образующих измерительный канал, последовательно поступает отражённый от объекта микроволновый сигнал на частоте f_S с временной задержкой τ, величина которой определяется УП φ. При этом исходные компоненты оптического излучения на входе ТАФМ f_C полностью подавляются, что существенно отличает предложенное решение от известных в лучшую сторону с точки зрения повышения точности измерений.

Тандемный амплитудно-фазовый модулятор. Спектры излучений на выходах АМ и ФМ модуляторов ТАФМ показаны на рис. 3.



а *б*

Рис. 3. Спектры излучений на выходах АМ (а) и ФМ (б) модуляторов ТАФМ
Fig. 3. Emission spectra at the outputs of AM (a) and PM (b) modulators of tandem amplitude-phase modulation (TAPM)

Как видно из рис. 3, разностная частота между составляющими выходного двухчастотного излучения (рис. 3, *а*) равна частоте модулирующего сигнала (рис. 3, *б*). Нелинейность модуляционной характеристики MZM приводит к появлению в спектре паразитных составляющих высших гармоник, амплитуда которых, однако, значительно меньше амплитуды полезных составляющих (до – 70 дБм). Для примера показана составляющая на выходе фотодетектора с частотой 13 ГГц.

Как показано в [3], для генерации двухчастотного сигнала с подавлением несущей такого уровня оптимальным коэффициентом амплитудной модуляции синусоидальным колебанием является m=0,55. Измерение параметров составляющих выходного излучения проводилось в диапазоне изменения m = [0,4…0,7], поскольку значение m зависит от уровня отражённого сигнала. Из анализа получено, что кривая зависимости амплитуды полезных составляющих от изменения коэффициента модуляции в исследуемом диапазоне m практически не изменяется, как и коэффициент нелинейных искажений, вызванный увеличением амплитуд нежелательных гармоник (несущей и гармоник высших порядков), который составил меньше 5 % для диапазона m=[0,49…0,61] и меньше 1 % для диапазона m=[0,52…0,58]. В фазовом модуляторе применяется фазовая коммутация ϕ на π в момент прохождения амплитудно-модулированного излучения своего минимума. Исследования выходного спектра при отклонении ϕ не проводились, поскольку управляющий сигнал для фазового модулятора формируется в специальном преобразователе, обеспечивающем требуемые для коммутации в π напряжения.

Принцип определения УП. Как следует из рис. 2 и принципа действия ТАФМ, отражённый сигнал в измерительном канале, принимаемый двумя антеннами, подключёнными к радиочастотным входам ТАФМ1 и ТАФМ2, имеет разность фаз θ, соответствующую УП φ и временной задержке τ:

$$\theta = 2\pi\left(f_S\tau - k\right), \qquad (2)$$

где k – целое число.

Суммарное электрическое поле на выходе ТАФМ1 и ТАФМ2 (ОО) может быть описано как:

$$E_{\text{out}1,2} = \frac{\alpha_i E_{in}}{2\sqrt{2}} e^{j2\pi f_C t}\left[J_1\left(m,\phi\right)e^{j\pi f_S t}\left(1-e^{j\theta}\right) - J_1\left(m,\phi\right)e^{-j\pi f_S t}\left(1-e^{-j\theta}\right)\right], \qquad (3)$$

где E_{in} – амплитуда электрического поля лазерного излучения, попадающего в ТАФМ, α_i – потери, вносимые ТАФМ, $J_1(m,\phi)$ – функция Бесселя первого порядка первого рода, m и ϕ – параметры амплитудного и фазового преобразования в ТАФМ, зависящие от амплитуды отражённого сигнала.

Выходной оптический сигнал блока ТАФМ поступает на фотодетектор, который генерирует фототок.

Амплитуда фототока на частоте f_S может быть получена из уравнения (3) и определяется как:

$$I_{f_S} = \Re\frac{\alpha_i^2 P_{in}}{4} J_1^2\left(m,\phi\right)\sqrt{2\left(1-\cos\theta\right)}, \qquad (4)$$

где $\Re$ – чувствительность фотодетектора, а P_{in} – мощность входного лазерного излучения для ТАФМ1,2.

Электрическая мощность на частоте f_S, то есть информационная пиковая мощность для получения информации об УП, может быть получена из уравнения (4) и определяется выражением

$$P_{f_S} = \Re^2\frac{\alpha_i^4 P_{in}^2}{16} J_1^4\left(m,\phi\right)R_L\left(1-\cos\theta\right), \qquad (5)$$

где R_L – сопротивление нагрузки фотоприёмника. Уравнение (5) показывает, что мощность информационного пика зависит от разности фаз θ отражённых сигналов на двух радиочастотных ТАФМ1 и ТАФМ2. Следовательно, УП отражённого сигнала φ может быть найден через определения θ из уравнения пиковой мощности (5), τ – из уравнения (2) и, наконец, φ – из уравнения (1).

Оценка преимуществ разработанного измерителя УП. Основная погрешность разработанного измерителя УП и прототипа [13] заключается в том, что индекс амплитудной модуляции, определяемый параметрами отражённого сигнала, как DD-MZM, так и в ТАФМ может меняться в широких пределах. Как показано в [13], при m=0,5 величина частично подавленной несущей лишь на 12 дБ меньше амплитуд информативных составляющих на частоте f_S. Кроме того, отмечено, что меньший коэффициент модуляции приводит к существенному снижению отношения сигнал/шум измерений. Таким образом, в обоих схемах должна быть установлена схема автоматической регулировки усиления (АРУ) для создания оптимальной величины отражённого сигнала на радиочастотном входе модуляторов. Однако, если для ТАФМ отсутствие такой схемы и приём отражённого сигнала без изменений приводит к минимальным искажениям информативной компоненты, то в прототипе от его амплитуды зависит и уровень подавления несущей частоты, и уровень высших составляющих второго порядка. Дополнительным средством снижения указанной погрешности является специальная калибровка, которая может быть проведена по методикам [12, 16].

Составляющие второго порядка для отражённого сигнала на частоте $2f_S$ в [13] генерируют на выходе фотоприёмника нежелательную составляющую биений на частоте f_S, зависящую по мощности аналогично (5), но от параметра 2θ, что приводит к идентификации несуществующего объекта. Отметим, что мощность этой нежелательной составляющей частотного компонента близка к мощности информативной составляющей с параметром θ.

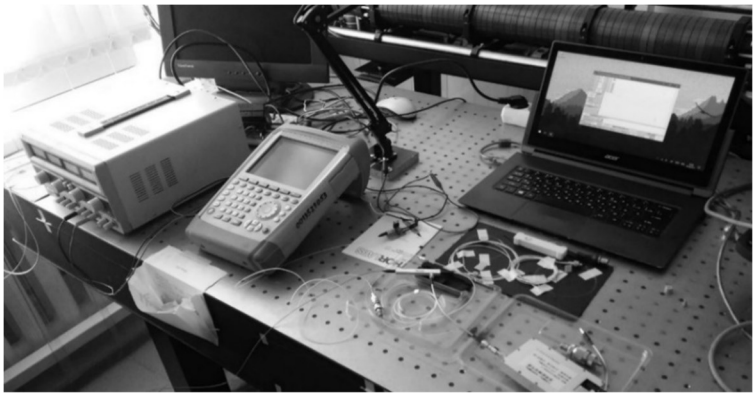
Таким образом, системные параметры разрабатываемого измерителя, такие как мощность информативных составляющих, зависящих от мощности лазерного источника (в случае ТАФМ она в 1,5 раза выше, чем после DD-MZM) и требуемого индекса модуляции для отсутствия составляющей на удвоенной частоте и полного подавления несущей (в обоих случаях m~0,5), значительно превышает минимальный уровень шума системы даже при небольшой разности фаз θ.

2. Экспериментальные результаты

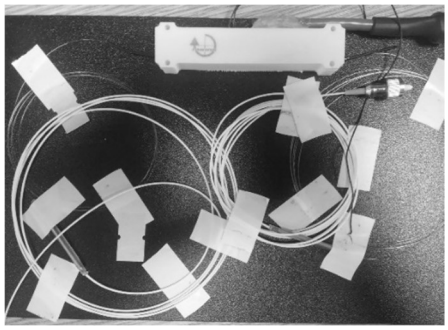
Для подтверждения работоспособности метода и сравнения полученных практических данных с расчётными на базе многоканальной системы измерения мгновенной частоты множества микроволновых радиосигналов [5] был собран экспериментальный макет. Общий вид макета представлен на рис. 4, *а*.

В устройстве используется узкополосный лазерный источник с распределённой обратной связью с центральной длиной волны 1 550 нм и шириной линии менее 10 МГц. Выход устройства контролировался с помощью ЭВАЦ Rohde & Schwarz FSH8, обладающего диапазоном частот до 8 ГГц, с подключением к ПК через программу FSH8 View для сохранения результатов измерений в виде массивов данных. В качестве амплитудных модуляторов АММЦ был использован амплитудный модулятор Маха-Цендера (рис. 4, *б*) предоставленный ПАО «ПНППК», Пермь. Фазовая модуляция осуществлялась с помощью электрооптического модулятора Thorlabs LN53S-FC (рис. 4, *в*). В качестве тестовой частоты использовалась частота 6,5 ГГц.

Сплошной линией на рис. 5 показаны зависимость мощности информативной компоненты на частоте f_S от разности фаз θ, а пунктирной линией – зависимость измеренного УП от заданного. Графики приведены для погрешности определения амплитуд информативных составляющих в 10^{-3} от полной шкалы измерений выходного тока фотодетектора.



а)



б)

в)

Рис. 4. Измеритель УП:
экспериментальный стенд (а); амплитудный модулятор Маха-Цендера ПАО «ПНППК» (б); фазовый модулятор Thorlabs (в)
Fig. 4. Angle-of-arrival measuring tool: experimental facility (a); Mach-Zehnder amplitude modulator developed by "PNPPK" PJSC (b); Thorlabs phase modulator (c)

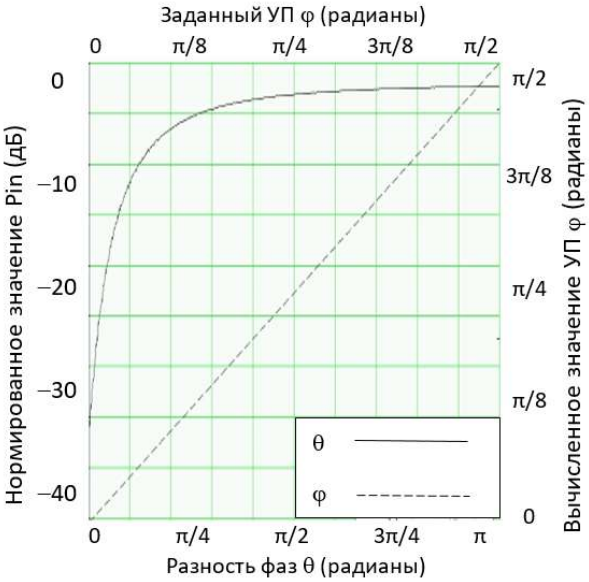


Рис. 5. Зависимость мощности информативной компоненты на частоте f_S от разности фаз θ (сплошная линия, левая и нижняя шкалы) и зависимость измеренного УП от заданного (пунктирная линия, верхняя и правая шкалы)
Fig. 5. Dependence of the power of the informative component at the frequency f_S on the phase difference θ (solid line, left and bottom scales) and the dependence of the measured angle-of-arrival on the given one (dashed line, top and right scales)

Информационная пиковая мощность была измерена на ЭВАЦ Rohde & Schwarz FSH8 для разности фаз отражённого сигнала от 0 до π, смоделированных генератором специальных сигналов. На рис. 5 (сплошная линия, левая и нижняя шкалы) показано, что информационная пиковая мощность увеличивается с увеличением разности фаз отражённого сигнала. Реально две антенны, подключённые к радиочастотным входам ТАФМ, должны быть расположены практически на расстоянии d~λ/2 (f_S=6,5 МГц). При этом условии расчётное соотношение между УП и разностью фаз θ будет определяться как $\varphi = \sin^{-1}(\theta/\pi)$. Вычисленное значение УП было получено на основе измеренных значений пиковой мощности и расчётных уравнений и также показано на рис. 5 (пунктирная линия, верхняя и правая шкалы). Результат статистических оценок по массиву измерений показывает, что погрешность измерения УП в диапазоне от 0 до π/2 составляет угол меньше ±1,7 мрад. В идеальном случае информативная компонента равна 0 при разности фаз θ=0 и равна нормированной 1 при θ=π. Однако на практике из-за несбалансированности сигналов на двух радиочастотных портах ТАФМ, отклонения параметров преобразования от оптимальных, нормализованная информативная пиковая мощность составляет около –35 дБ при разности фаз θ=0 и –2 дБ при разности фаз θ=π.

Заключение. Представлен новый измеритель УП на основе технологий радиофотоники. Он имеет очень простую структуру, аналогичную волоконно-оптической линии связи, образованной лазером, блоком электрооптических модуляторов и фотодетектором. Блок электрооптических модуляторов построен на основе ТАФМ, что позволило полностью подавить лазерную несущую и предотвратить возможность её появления, так же, как и составляющей на удвоенной информативной частоте, при отклонении модуляционных параметров от оптимальных. УП определяется по разности фаз попадания отражённого сигнала на элементы антенны и мощности составляющей на частоте отражённого сигнала, измеренного в ЭВАЦ. Проведены экспериментальные исследования для верификации принципов работы измерителя УП. Получены результаты, которые демонстрируют как положительные, так и отрицательные черты измерителя. Результат статистических оценок по массиву измерений показывает, что погрешность измерения УП в диапазоне от 0 до π/2 составляет угол меньше ±1,7 мрад. В идеальном случае информативная компонента равна 0 при разности фаз θ=0 и равна нормированной 1 при θ=π. Однако на практике из-за несбалансированности сигналов на двух радиочастотных портах ТАФМ, отклонения параметров преобразования от оптимальных, нормализованная информативная пиковая мощность составляет около –35 дБ при разности фаз θ=0 и –2 дБ при разности фаз θ=π.

Новый радиофотонный измеритель УП представляет собой простое, недорогое и надёжное решение, которое преодолевает недостатки известных решений. Дальнейшей задачей для его совершенствования необходимо определить возможность измерений УП совместно с доплеровским изменением частоты отражённого сигнала и значением его мгновенной частоты. При этом для повышения точности измерений желательно перенести их реализацию из гигагерцового диапазона в мегагерцовый, что дополнительно позволит снизить стоимость применяемого фотодетектора. Его преимущества могут стать более существенными при построении измерителя по технологиям интегральных фотонных схем. Это позволит использовать универсальный измеритель в задачах создания новых оборонных радиофотонных локаторов и их применения для гражданских задач, например, для задач экологического мониторинга.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания КНИТУ-КАИ № 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020, программа «Фократ»).

Список литературы

1. *Pan S., Zhang Y.* Microwave Photonic Radars // Journal of Lightwave Technology. 2020. Vol. 38(19). Pp. 5450-5484.
2. *Yang C., Wang L. and Liu J.* Photonic-Assisted Instantaneous Frequency Measurement System Based on a Scalable Structure // IEEE Photonics Journal. 2019. Vol. 11(3). Pp. 1-11.
3. *Il'In G.I., Morozov O.G. and Il'In A.G.* Theory of symmetrical two-frequency signals and key aspects of its application // Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9156. P. 91560M.
4. 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. 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. 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. 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. 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. 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 // International Topical Meeting on Microwave Photonics. 1998. Pp. 137–140.
11. 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). Pp. 755–757.
12. Angle-of-arrival measurement of a microwave signal using parallel optical delay detector / Z. Cao, H.P.A. van den Boom, R. Lu et al. // IEEE Photonics Technol. Lett. 2013. Vol. 25(19). Pp. 1932–1935.
13. *Huang C., Chen H., and Chan E.H.W.* Simple photonics-based system for Doppler frequency shift and angle of arrival measurement // Optics Express. 2020. Vol. 28(9). Pp. 14028-14037.
14. *Choe J.Y.* Defense RF systems: future needs, requirements, and opportunities for photonics // International Topical Meeting on Microwave Photonics. 2005. Pp. 307–310.
15. Многоканальный радиофотонный приемный тракт / С.М. Конторов, А.В. Шипулин, Ф. Кюпперс и др.// Фотоника. 2019. Т. 13. № 6. С. 584-593.
16. *Chen H. and Chan E.H.W.* Angle of arrival measurement system using double RF modulation technique // IEEE Photonics J. 2019. Vol. 11(1). Pp. 1-10.

Статья поступила в редакцию 01.02.2021
Принята к публикации 15.03.2021

Информация об авторах

МОРОЗОВ Олег Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофотоники и микроволновых технологий, директор НИИ прикладной электродинамики, фотоники и живых систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – радиофотонные технологии сенсорики и телекоммуникаций. Автор 450 научных публикаций и патентов.

МОРОЗОВ Геннадий Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – антенны, микроволновые технологии, микроволновая фотоника. Автор 355 научных публикациё и патентов.

ИЛЬИН Герман Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электронных и квантовых систем передачи информации, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – лазерные и радиотехнические системы, теория потенциальной помехоустойчивости. Автор 352 научных публикаций и патентов.

НУРЕЕВ Ильнур Ильдарович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации. Автор 250 научных публикаций.

САХАБУТДИНОВ Айрат Жавдатович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – микроволновая фотоника; волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации. Автор 200 научных публикаций и патентов.

РОСТОКИН Илья Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры управления и контроля в технических системах, Муромский институт имени В.К. Зворыкина, филиал Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. Область научных интересов – микроволновая радиометрия, радиофотоника и системы дистанционного зондирования. Автор 100 научных публикаций и патентов.

ИВАНОВ Александр Алексеевич – кандидиат технических наук, старший преподаватель кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – микроволновая фотоника. Автор 40 научных публикаций и патентов.

ЛУСТИНА Александра Алексеевна – ведущий инженер отдела интеллектуальной собственности и трансфера технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – микроволновая фотоника, измерительные СВЧ-системы. Автор 10 научных публикаций.

ДЕНИСЕНКО Евгений Петрович – доцент кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – микроволновая фотоника; волоконно-оптические сенсоры и системы. Автор 30 научных публикаций и патентов.

ДЕНИСЕНКО Павел Евгеньевич – кандидиат технических наук, доцент кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – радиофотоника; волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации. Автор 30 науных публикаций и патентов.

АНДРЕЕВ Владимир Дмитриевич – международнымй эксперт, АНО «Агентство развития профессионального мастерства». Область научных интересов – микроволновая фотоника; волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации. Автор 25 научных публикаций и патентов.

UDC 621.383
DOI: https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.50

MICROWAVE PHOTONIC METHOD FOR MEASURING THE ANGLE-OF-ARRIVAL OF RADAR ECHO SIGNAL WITH TANDEM AMPLITUDE-PHASE MODULATION

O. G. Morozov[1] *, G. A. Morozov[1], G. I. Ilyin[1], I. I. Nureyev[1], A. Zh. Sakhabutdinov[1], I. N. Rostokin[2], A. A. Ivanov[1], A. A. Lustina[1], E. P. Denisenko[1], P. E. Denisenko[1], V. D. Andreev[1]

[1]Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
10, Karl Marx Street, Kazan, 420111, Russian Federation
*E-mail: OGMorozov@kai.ru
[2]Murom Institute named after V.K. Zvorykin,
branch of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov
23, st. Orlovskaya, Murom, 602264, Russian Federation

Keywords: *microwave photonics; radar; angle-of-arrival; tandem amplitude-phase modulator; conversion of single-frequency laser radiation into dual-frequency one with complete suppression of the original carrier; photonic integrated circuits.*

ABSTRACT

Introduction. *Paper presents a novel approach that is based on radio photonics technologies and aims at measuring the angle-of-arrival (AoA) of a microwave radar signal reflected from a moving object. The application of radiophotonics ensures the most important benefits of the method, such as a wide instantaneous bandwidth and immunity to electromagnetic interferences during the measurements, as well as implementation advantages - the small size and light weight of the AoA measuring tools.* ***The aim of the work*** *is to present and experimentally prove the new radiophotonic AoA measuring tool.* ***The principle behind measuring tool.*** *AoA measuring tool has the same structure as a classical fiber-optic communication channel and consists of a laser, a block of electro-optical modulators and a photodetector. To process the microwave echo signal in the optical range, there is used a block of electro-optical modulators, which, in contrast to the known solutions based on a two-port Mach-Zehnder amplitude modulator, consists of two parallel subunits that are built on the single-port tandem amplitude-phase modulators (TAPM). A microwave echo signal with a time delay, defined by the AoA is sequentially fed to the radio frequency inputs of TAPMs through the connected receive antennas. The components of the laser carrier at the both TAPM outputs are suppressed, which stands out the proposed solution from the known ones in terms of higher measurement accuracy. The beats of the TAPM output signals at the photodetector output represent a converted echo signal which power is used to yield AoA. Thus, the measuring tool has a very simple structure and low cost, has a wide operating frequency range, defined by the bandwidth of modulators and photodetectors. Another advantage is a high reliability due to a simple procedure of calibrating and monitoring the temperature regimes of the elements, especially if the tool is made on the basis of integral photonic schemes.* ***Findings.*** *Experiments showed that the AoA can be measured with an error less than ± 1.7 mrad in the range from 0 to π/2 if the power of the informative component is measured at the echo signal frequency with an error of ± 10^{-3}.*

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment of Kazan National Research Technical University (KNRTU-KAI) No. 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020, program "Fokrat").

REFERENCES

1. Pan S., Zhang Y. Microwave Photonic Radars. *Journal of Lightwave Technology*. 2020. Vol. 38(19). Pp. 5450-5484.

2. Yang C., Wang L. and Liu J. Photonic-Assisted Instantaneous Frequency Measurement System Based on a Scalable Structure. *IEEE Photonics Journal*. 2019. Vol. 11(3). Pp. 1-11.

3. Il'In G.I., Morozov O.G. and Il'In A.G. Theory of symmetrical two-frequency signals and key aspects of its application. *Proc. of SPIE*. 2014. Vol. 9156. P. 91560M.

4. Morozov O.G., Il'in G.I., Morozov G.A. et al. External amplitude-phase modulation of laser radiation for generation of microwave frequency carriers

and optical poly-harmonic signals: an overview. *Proc. of SPIE*. 2016. Vol. 9807. P. 980711.

5. Morozov O.G., Nureyev I.I., Sakhabutdinov A.Zh. et al. Izmerenie mgnovennoy chastoty mikro-volnovykh signalov s ispol'zovaniem tandemnoy am-plitudno-fazovoy modulyatsii v opticheskom diapazone [Measurement of the instantaneous frequen-cy of micro-wave signals using tandem amplitude-phase modulation in the optical range]. *Foton-ekspress* [Photon Express]. 2019. No 5 (157). Pp. 16-24. (In Russ.).

6. Batyrshin I. I., Morozov O. G., Ivanov A. A. et al. Analiz pogreshnosti izmerenija mgnovennoj chastoty SVCh-signalov v brilljujenovskih radiofotonnyh sistemah [Measurement Errors Analysis of the UHF Signals Instant Frequency in Brillouin Microwave Systems]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja* [Scientific and Technical Volga Region Bulletin]. 2018. No. 5. P. 102-104. (In Russ.).

7. Ivanov A.A., Sakhabutdinov A.J., Morozov O.G. et al. Multiple frequencies analysis in tasks of FBG based instantaneous frequency measurements. *Proc. of SPIE*. 2018. Vol. 10774. P. 107740Y.

8. Ivanov A.A., Morozov O.G., Andreev V.A. et al. Microwave photonic system for instantaneous frequency measurement based on principles of "frequency-amplitude" conversion in fiber Bragg grating and additional frequency separation. *Proc. of SPIE*. 2017. Vol. 10342. P. 103421A.

9. Kang B., Fan Y., Wang W. et al. 6–40 GHz photonic microwave Doppler frequency shift measurement based on polarization multiplexing modulation and I/Q balanced detection. *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. *International Topical Meeting on Microwave Photonics*. 1998. Pp. 137–140.

11. Zou X., Li W., Pan W. et al. Photonic approach to the measurement of time-difference-of-arrival and angle-of-arrival of a microwave signal. *Opt. Lett*. 2012. Vol. 37(4). Pp. 755–757.

12. Cao Z., H.P.A. van den Boom, Lu R. et al. Angle-of-arrival measurement of a microwave signal using parallel optical delay detector. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2013. Vol. 25(19). Pp. 1932–1935.

13. Huang C., Chen H., and Chan E.H.W. Simple photonics-based system for Doppler frequency shift and angle of arrival measurement. *Optics Express.* 2020. Vol. 28(9). Pp. 14028-14037.

14. *Choe J.Y.* Defense RF systems: future needs, requirements, and opportunities for photonics // International Topical Meeting on Microwave Photonics. 2005. Pp. 307–310.

15. Kontorov S. M., Shipulin A. V., Kuppers F. et al. Mnogokanal'nyj radiofotonnyj priemnyj trakt [Multi-Channel Radio Photon Receiving Path]. *Fotonika* [Photonics]. 2019. Vol. 13. No 6. P. 584-593. (In Russ.).

16. Chen H. and Chan E.H.W. Angle of arrival measurement system using double RF modulation technique. *IEEE Photonics J.* 2019. Vol. 11(1). Pp. 1-10.

The article was received 01.02.2021
Accepted for publication 15.03.2021

For citation: Morozov O. G., Morozov G. A., Ilyin G. I., Nureyev I. I., Sakhabutdinov A. Zh., Rostokin I. N., Ivanov A. A., Lustina A. A., Denisenko E. P., Denisenko P. E., Andreev V. D. Microwave Photonic Method for Measuring the Angle-of-Arrival of Radar Echo Signal with Tandem Amplitude-Phase Modulation. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2021. No 1 (49). Pp. 50–62. DOI: https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.50

Information about the authors

Oleg G. Morozov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Radio-photonics and Microwave Technologies, CEO of the Research Institute of Applied Electrodynamics, Photonics and Living Systems, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – radio-photonic technologies in sensors and telecommunications.The author of 450 scientific publications and patents.

Gennady A. Morozov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor at the Department of Radio-Electronic and Telecommunication Systems, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – antennas, microwave technologies, microwave photonics. The author of 355 scientific publications and patents.

German I. Ilyin – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor at the Department of Electronic and Quantum Systems for Data Transmission, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – laser and radio engineering systems, theory of potential noise immunity. The author of 352 scientific publications and patents.

Ilnur I. Nureev – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Radio-photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – fiber-optic sensors and interrogation systems. The author of 250 scientific publications.

Airat Zh. Sakhabutdinov – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Radio-photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – microwave photonics, fiber optic sensors and interrogation systems. The author of 200 scientific publications and patents.

Ilya N. Rostokin – Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Management and Control in Technical Systems, Murom Institute (branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolay Grigoryevich Stoletovs”. Research interests – microwave radiometry, radio-photonics and remote sensing systems. The author of 100 scientific publications and patents.

Aleksandr A. Ivanov – Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer at the Department of Radio-photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – microwave photonics. The author of 40 scientific publications and patents.

Alexandra A. Lustina – Leading Engineer at the Department of Intellectual Property and Technology Transfer, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – microwave photonics, microwave measuring systems. The author of 10 scientific publications.

Evgeniy P. Denisenko – Associate Professor at the Department of Radio-photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – microwave photonics, fiber optic sensors and systems. The author of 30 scientific publications and patents.

Pavel E. Denisenko – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Radio-photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – radio-photonics, fiber optic sensors and interrogation systems. The author of 30 scientific publications and patents.

Vladimir D. Andreev – international expert, Autonomous non-profit organization "Skills development agency (WorldSkills Russia)". Research interests – microwave photonics; fiber-optic sensors and interrogation systems. The author of 25 scientific publications and patents.