

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ INSTRUMENT ENGINEERING

Научная статья

УДК 621.383

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.3.58>

### Простой модуль локационных измерений доплеровского сдвига частоты и угла прихода на основе двухканальной поляризационной тандемной амплитудно-фазовой модуляции. Часть 1

**О. Г. Морозов<sup>✉</sup>, Г. А. Морозов, Г. И. Ильин, П. Е. Денисенко, В. Д. Андреев**

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ,

Российская Федерация, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10

OGMorozov@kai.ru<sup>✉</sup>

**Аннотация.** В статье предлагается простой метод радиофотонных измерений доплеровского сдвига частоты и угла прихода эхосигналов в системах автономного вождения, который позволяет удобно и точно получать информацию путём сравнения частоты и фазы огибающих биений двух каналов, разделённых по поляризации, за малый период времени. О знаке ДСЧ и его значении при угле прихода  $90^\circ$  можно судить благодаря введению опорного гетеродинного сигнала с заданной частотой и фазой. В модуле, реализующем метод, используются два параллельных тандемных амплитудно-фазовых модулятора для получения двухчастотных сигналов с подавленной несущей и разностной частотой, равной частоте сигналов системы: локационного, гетеродинного и двух эхосигналов с соседних элементов антенной решётки. В первой части статьи приведён сравнительный анализ существующих радиофотонных методов и средств одновременного или практически одновременного измерения доплеровского сдвига частоты и угла прихода и описан принцип действия модуля, реализующего предложенный метод, оценочно показаны его преимущества и недостатки. Целевые характеристики, предполагаемые к достижению, заключаются в измерении доплеровского сдвига частоты в диапазоне  $\pm 100$  кГц и диапазоне локационных частот 15–40 ГГц с погрешностью в  $\pm 10$  Гц и измерении угла прихода в диапазоне от 0 до  $\pi/2$  с погрешностью менее  $\pm 1,7$  мрад.

**Ключевые слова:** радиофотоника; радиолокация; доплеровский сдвиг частоты; угол прихода; тандемный амплитудно-фазовый модулятор; поляризационное разделение каналов; опорный гетеродинный радиосигнал с заданной частотой и фазой

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020) и Программе «Приоритет-2030».

---

© Морозов О. Г., Морозов Г. А., Ильин Г. И., Денисенко П. Е., Андреев В. Д., 2022.

**Для цитирования:** Морозов О. Г., Морозов Г. А., Ильин Г. И., Денисенко П. Е., Андреев В. Д. Простой модуль локационных измерений доплеровского сдвига частоты и угла прихода на основе двухканальной поляризационной тандемной амплитудно-фазовой модуляции. Часть 1 // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 3 (55). С. 58–71. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.3.58>

**Введение.** В последние годы разработка интеллектуальных систем помощи водителю и автономного вождения вышла на новый уровень сложности. Для определения местоположения автономные транспортные средства используют различные датчики, построенные на технологиях технического зрения, ультразвуковых дальнометров, лидаров и радаров. Из-за своей устойчивости к погодным условиям и способности работать на большом расстоянии последние играют значительную роль в обеспечении функций автономного вождения и, следовательно, нуждаются в постоянном совершенствовании своих функций.

Одной из новых, активно развивающихся функций радаров, необходимой для обеспечения процессов интеллектуального или автономного вождения, является функция определения местоположения и параметров движения других объектов в реальном времени [1–2], что включает в себя одновременное измерение доплеровского сдвига частоты (ДСЧ), а также угла прихода (УП) [3–4] отражённого от них радиосигнала. ДСЧ представляет собой частотный сдвиг между радиосигналами зондирования и отражения и применяется для определения скорости объекта вождения. Траекторию движения рядом идущего объекта можно оценить с помощью УП, который можно рассчитать через разность фаз между двумя отражёнными от него радиосигналами, принимаемыми пространственно разнесёнными антеннами, установленными на объекте вождения. Однако узкая полоса пропускания и низкая стабильность электронных устройств ограничивает применение традиционных радиотехнических систем.

В последнее время, благодаря неотъемлемым преимуществам большой мгновенной полосы пропускания, низким потерям при передаче и невосприимчивости к электромагнитным помехам, разработано множество методов, основанных на технологиях радиофотоники, для реализации радиоизмерений ДСЧ и УП [5–11] в оптическом диапазоне.

Например, ДСЧ можно просто измерить с помощью радиофотонного смесителя [12, 13]. Для определения направления движения, знака ДСЧ используется опорный радиосигнал, вводимый через акустооптический модулятор [14] или дополнительный источник СВЧ-диапазона [8,16], или с помощью дополнительной разности фаз для фотонного I/Q-смесителя [17]. С другой стороны, для измерения УП также используются разные методы [3, 18–20]. Например, в [18] УП переводится в эквивалент когерентной временной задержки, который можно получить путём измерения частоты режекции радиофотонного фильтра. Кроме того, УП также может быть получен путём измерения оптической мощности [19], постоянного выходного напряжения системы с одной поляризацией [20] или отношения постоянных выходных напряжений системы с двумя ортогональными поляризациями [3].

Большинство описанных ранее схем могут измерять либо ДСЧ, либо УП, но не то и другое одновременно. Чтобы одновременно получить ДСЧ и УП, в [22] предложен подход, основанный на параллельном микроволновом фотонном смесителе, который позволяет получить информацию о ДСЧ по частоте огибающей биеений (ОБ) между сигналами двух каналов после их преобразования с понижением частоты, а УП – по разности фаз между ними. Недавно была предложена простая схема оценки ДСЧ и УП на основе стандартного оптоволоконного канала связи с DP-DDMZM модулятором [5], в котором ДСЧ получается путём введения в схему опорного сигнала [16], а УП рассчитывается путём измерения мощности сигнала ОБ.

В обеих схемах невозможно получить данные с направления, перпендикулярного отрезку, соединяющему две приёмные антенны. Для решения этой проблемы используется микроволновый фотонный I/Q-смеситель с поляризационным мультиплексированием [3]; однако структура данной схемы очень сложна. Более про-

стая схема без оптического фильтра предложена в [22], в которой реализован двухканальный микроволновый фотонный I/Q-смеситель с поляризационным мультиплексированием на однополосных модуляторах. Однако эти схемы, предъявляя жёсткие требования к коэффициенту подавления несущей, фазовому дисбалансу оптического ответвителя и смещению модулятора, характеризуются высокой степенью сложности и необходимостью использования цифрового осциллографа. Не следует забывать и недостатки реализации однополосной модуляции с возникновением паразитных частотных составляющих от не до конца подавленной боковой полосы.

Для устранения указанных недостатков нами в [23–25] предложено строить схему блока модуляторов для определения ДСЧ [23] и УП [24] на основе тандемных однопортовых амплитудного и фазового модуляторов (ТАФМ), реализующих метод преобразования одночастотного когерентного излучения Ильина–Морозова с полным подавлением несущей и высокой спектральной чистотой при отклонении параметров амплитудно-фазового преобразования от оптимальных [26, 27]. Кроме этого, использование эффекта расщепления зондирующей частоты на две, разнесённые на опорную частоту, также реализуемое с помощью ТАФМ [28], позволит устранить сложность реализации и повысить стабильность канала измерения ДСЧ. В [23] измеритель ДСЧ имеет ту же структуру, что и последовательное радиофотонное звено с фильтрацией и состоит из лазера, блока электрооптических модуляторов, волоконной брэгговской решётки (частотного дискриминатора) и фотодетектора (ФД). Измеритель УП [24] имеет ту же структуру, что и классический волоконно-оптический канал связи и состоит из лазера, блока электрооптических модуляторов и фотодетектора.

Таким образом, измерители [23, 24] имеют очень простую структуру и невы-

сокую стоимость, широкий диапазон рабочих частот, определяемый полосой пропускания модуляторов, и низкочастотный фотодетектор, обеспечивают высокую надёжность работы, обусловленную простой процедурой калибровки и контроля температурных режимов элементов, тем более, если они изготовлены на базе интегральных фотонных схем. Для обработки сигналов измерителей разработан универсальный программно-аппаратный анализатор спектра для измерения ДСЧ и его знака [25], который может быть применён и для определения УП.

**Цель** настоящей статьи – разработка простой радиофотонной системы для одновременного измерения ДСЧ и УП, которая получает информацию о них путём сравнения соответственно значений частоты и фазового сдвига, преобразованных с понижением частоты сигналов двух каналов, а благодаря введению опорного сигнала частоты и опорной фазы – и о знаке ДСЧ, и о УП с направления, перпендикулярного отрезку, соединяющему две приёмные антенны.

**Задачи**, решённые в статье, отражают следующие требования. В разрабатываемой системе локационный, отражённый и гетеродинный радиосигналы подаются на два ТАФМ, каждый из которых определяет один канал измерений с полным подавлением несущей. В результате ДСЧ (включая значение и знак) и УП могут быть получены из анализа сигналов двух каналов по параметрам огибающей их биений. При этом система должна позволять получить данные с направления, перпендикулярного отрезку, соединяющему две приёмные антенны, для чего каналы выполняются ортогонально-поляризованными. Кроме того, в отличие от указанных выше работ с такой возможностью в них не должно быть необходимости в применении осциллографа для определения УП, а электронный векторный анализатор должен быть заменён на универсальный программно-аппаратный анализатор спектра для измерения одновремен-

но с ДСЧ со знаком и УП, в основу работы которого положены принципы измерительного преобразования «частота–амплитуда» для ДСЧ, и определения разности фаз огибающих биений двухчастотного излучения по его информационной структуре для получения значения УП, широко применяемые нами в радиофотонных системах различного назначения [29–32].

**Структурная схема модуля.** Структурная схема системы представлена на рис. 1. Её основой является блок модуляции на основе ТАФМ, состоящих из пары последовательно включённых электрооптических амплитудного и фазового модуляторов Маха–Цендера (АММЦ и ФММЦ). АММЦ содержит в своей структуре ортогональные входной поляризатор и выходной анализатор, а его рабочее состояние контролируется напряжением смещения, что на рис. 1 не показано. Верхний ТАФМ образует канал измерения ДСЧ, нижний – УП. Положение поляризаторов и анализаторов в обоих каналах ортогонально.

Как показано на рис. 1, излучение лазерного диода (ЛД) с поляризационным коэффициентом экстинкции, близким к 1, делится оптическим разветвителем (ОР, 3 дБ) на два канала и поступает на поляризаторы, встроенные в амплитудные модуляторы Маха–Цендера АММЦ1 и АММЦ2, излучения на выходе которых

являются линейно и ортогонально поляризованными:

$$\begin{cases} E_{\text{ДСЧ}}(t) = (E_0/\sqrt{2}) \exp^{j\omega_c t}, \\ E_{\text{УП}}(t) = j(E_0/\sqrt{2}) \exp^{j\omega_c t}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $E_0$  – амплитуда, а  $\omega_c$  – угловая частота излучения ЛД.

В предлагаемой системе используются три вида сигналов: локационный ( $L$ ), гетеродинный (опорный) ( $G$ ) и два отражённых (эхосигналы  $E_1$  и  $E_2$ ) с элементов приёмной антенны, которые можно описать как:

$$\begin{cases} V_L(t) = V_L \cos \omega_L t, \\ V_G(t) = V_G \cos(\omega_L t + \phi), \\ V_{E_1}(t) = V_{E_1} \cos \omega_E t, \\ V_{E_2}(t) = V_{E_2} \cos(\omega_E t + \theta), \end{cases} \quad (2)$$

где  $V_L$  и  $\omega_L$  – амплитуда локационного сигнала и его угловая частота соответственно. Аналогично,  $V_G$  и  $\omega_G$  – амплитуда сигнала и угловая частота гетеродинного сигнала, а  $V_{E_1}$ ,  $V_{E_2}$  и  $\omega_E$  – амплитуда первого и второго и угловая частота эхосигналов соответственно,  $\phi$  – заданная начальная фаза гетеродина,  $\theta$  – измеряемая разность фаз эхосигналов.

Пары сигналов  $V_L(t)$  и  $V_G(t)$  могут подаваться на АММЦ либо поочерёдно, либо одновременно, что будет расписано отдельно при описании процесса измерения ДСЧ и УП.

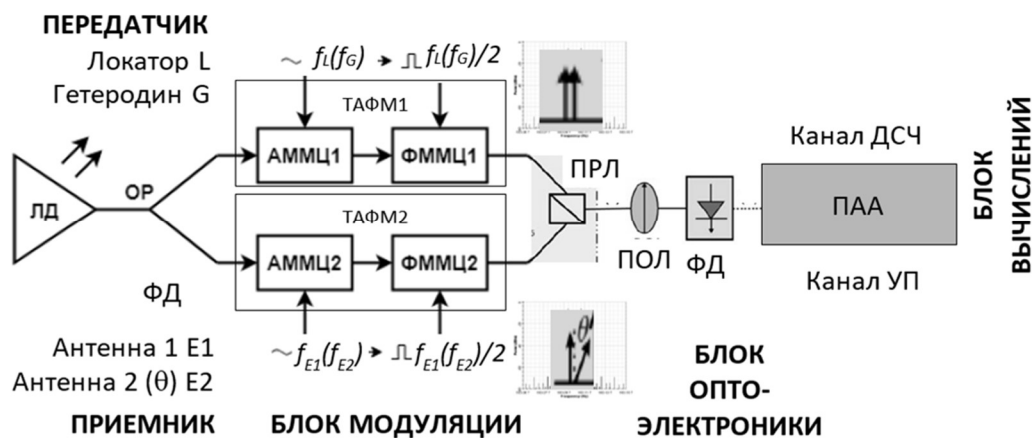


Рис. 1. Структурная схема модуля  
Fig. 1. Structural scheme of the module

В ФММЦ происходит фазовая коммутация полученных амплитудно-модулированных сигналов, в соответствии с методом Ильина–Морозова [26, 27]. На выходе ТАФМ мы получаем двухчастотные сигналы с подавленной несущей, отличительной чертой которых от классических видов модуляции является разностная частота между составляющими, равная частоте модулирующих сигналов.

**Измерение доплеровского сдвига частоты и его знака.** При одновременной подаче сигналов  $V_L(t)$  и  $V_G(t)$  электрическое поле на выходе ТАФМ1 имеет вид:

$$E_{\text{ТАФМ1}} = \frac{\alpha_1 E_0}{\sqrt{2}} e^{j\omega_c t} \times \left\{ J_{+1}(m_{L,G}, \psi_{L,G}) e^{[j(\omega_L + \omega_G)t + \phi]} - J_{-1}(m_{L,G}, \psi_{L,G}) e^{[-j(\omega_L + \omega_G)t + \phi]} \right\}, \quad (3)$$

где  $\alpha_1$  – потери, вносимые ТАФМ1,  $J_1(m_{L,G}, \psi_{L,G})$  – функция Бесселя первого порядка первого рода,  $m_{L,G}$  и  $\psi_{L,G}$  – оптимальные параметры амплитудного и фа-

зового преобразования сигналов на частотах  $\omega_L$  и  $\omega_G$  в модуляторах ТАФМ1.

Для измерения ДСЧ достаточно на вход ТАФМ2 подать отражённый эхосигнал  $V_{E_1}(t) = V_{E_1} \cos \omega_E t$ . Тогда электрическое поле на выходе ТАФМ2 будет иметь вид:

$$E_{\text{ТАФМ2}} = j \frac{\alpha_2 E_0}{\sqrt{2}} e^{j\omega_c t} \left\{ J_{+1}(m_{E_1}, \psi_{E_1}) e^{j\omega_E t} - J_{-1}(m_{E_1}, \psi_{E_1}) e^{-j\omega_E t} \right\}, \quad (4)$$

где  $\alpha_2$  – потери, вносимые ТАФМ2,  $J_1(m_{E_1}, \psi_{E_1})$  – функция Бесселя первого порядка первого рода,  $m_{E_1}, \psi_{E_1}$  – оптимальные параметры амплитудного и фазового преобразования сигнала с первого элемента антенны на частоте  $\omega_E$  в модуляторах ТАФМ2.

Спектральная картина измерения ДСЧ при заданной фазе гетеродина  $\phi$ , равной 0, представлена на рис. 2.

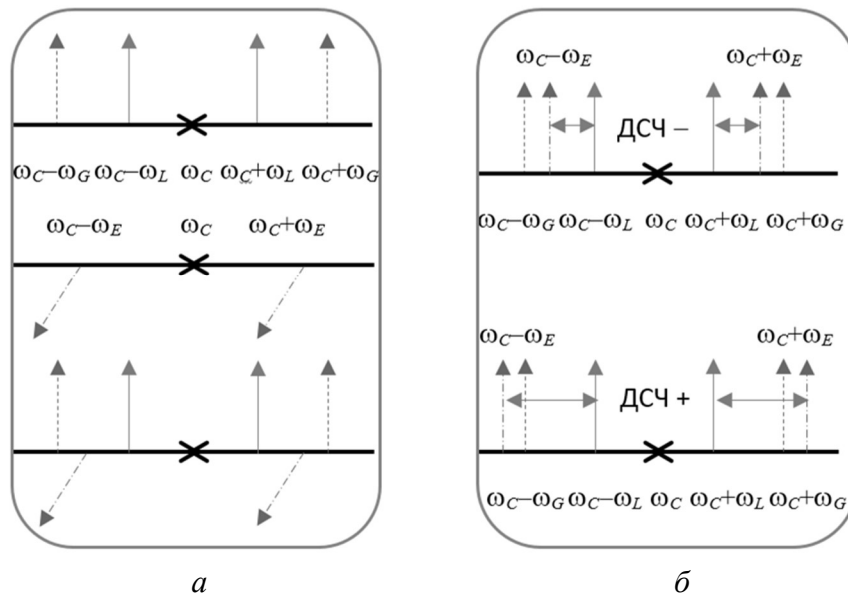


Рис. 2. Спектральная картина измерения ДСЧ: спектр на выходе ТАФМ1, ТАФМ2, ПРЛ соответственно (а);

постановка задачи для ПААС по определению  $\omega_E$ , ДСЧ и его знака (выход ПОЛ) (б)

Fig. 2. Spectral pattern of measuring the Doppler frequency shift (DFS): spectrum at the output of tandem single-port amplitude and phase modulators TAPM1, TAPM2, polarization beam splitter (PBS), respectively (a); formulation of the problem for a hardware-software spectrum analyzer (HSSA) to determine  $\omega_E$ , DFS and its sign (polarizer (POL) output) (b)

Локационный сигнал и сигнал гетеродина генерируют боковые частоты  $\pm 1$ -го порядка одновременно, как показано на рис. 2, а (сверху), в то время как эхосигнал генерирует боковые частоты  $\pm 1$ -го порядка с ортогональной поляризацией, как показано на рис. 2, а (в середине). Выходные оптические боковые частоты с ортогональными состояниями поляризации от двух ТАФМ объединяются с помощью поляризационного разделителя луча (ПРЛ), как показано на рис. 2, а (внизу). Затем полученные поляризационные мультиплексированные сигналы отправляются на поляризатор (ПОЛ), настроенный так, чтобы обе входные поляризации проецировались на единую ось его поляризации.

Поскольку ДСЧ в большинстве случаев ниже 100 кГц, для преобразования боковых частот с полученным одинаковым состоянием поляризации в электрические сигналы биений используется низкоскоростной ФД. Из-за ограничения полосы пропускания ФД устраняются высокочастотные радиочастотные сигналы, генерируемые частотными биениями. Постановка задачи для программно-аппаратного анализатора (ПАА) спектра для определения  $\omega_E$ , ДСЧ и его знака представлена на рис. 2, б. Задача может быть решена как в оптическом диапазоне, так и в радиодиапазоне с получением численных значений частоты эхосигнала, ДСЧ и его знака. На рис. 2, б показана постановка задачи для первого варианта, на рис. 1 – структура системы в части блока оптоэлектроники и вычислений для последнего варианта, принцип решения и действия которых изложены в [25], а детально представим их во второй части статьи.

Можно получить абсолютное значение и знак ДСЧ, анализируя радиоспектры по другому алгоритму, но более дорогому – с использованием электронного векторного анализатора спектра (ЭВАЦ). Минимальная угловая частота  $|\omega_E - \omega_L|$  среди трёх электрических сигналов является абсолютным значением ДСЧ, в то время как знак ДСЧ можно определить, сравнивая частоты двух дополнительных радиочастотных сигналов,

которые генерируются одновременно благодаря введению гетеродинного сигнала. Один из них, генерируемый биениями между локационным и гетеродинным сигналом, представляется как  $\omega_L - \omega_G$ , а другой – как  $\omega_E - \omega_G$ . В частности, ситуация, когда  $|\omega_E - \omega_G| > |\omega_L - \omega_G|$ , соответствует отрицательному знаку, указывая на то, что цель удаляется от источника. Наоборот, ситуация, когда  $|\omega_E - \omega_G| < |\omega_L - \omega_G|$ , соответствует положительному знаку, указывая на то, что цель движется к источнику. Кроме того, радиальная скорость движущейся цели может быть получена одновременно с измерением значения ДСЧ. В соответствии с теорией о том, что частотный сдвиг пропорционален скорости цели, радиальная скорость вдоль направления прямой видимости моностатической радиолокационной системы, в которой и передатчик, и приёмник расположены вместе, может быть оценена как [6]:

$$v = c(f_{\text{ДСЧ}}/2f_L) = c(|f_E - f_L|/2f_L), \quad (5)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $f_{\text{ДСЧ}}$  – доплеровский сдвиг частоты. Согласно вышеприведённому теоретическому анализу можно отметить, что знак и значение ДСЧ, а также радиальная скорость могут быть получены одновременно, что является прямым и эффективным решением данной задачи.

**Измерение угла прихода.** Эхосигналы в измерительном канале, принимаемые двумя антеннами, подключёнными к радиочастотным входам ТАФМ2, имеют разность фаз  $\theta$ , соответствующую УП  $\varphi$  и временной задержке  $\tau$  [5]:

$$\theta = 2\pi(f_E\tau - k), \quad (6)$$

где  $k$  – целое число.

При этом УП равен

$$\varphi = \cos^{-1}(c\tau/d), \quad (7)$$

где  $\tau$  и  $d$  – относительная временная задержка между двумя эхосигналами и расстояние между двумя элементами антенн приёмника.

Измерение УП прихода осуществляется в два этапа за минимально короткое время, как правило, меньше 3 мс.

На первом этапе используются данные, полученные при измерении ДСЧ, а именно определяется частота биений между локационной частотой и частотой эхосигнала при нулевой фазе:

$$\begin{cases} i \propto \cos(\omega_L - \omega_E) \\ \text{при } \omega_L > \omega_E \text{ (ДСЧ} > 0), \\ i \propto \cos(\omega_E - \omega_L) \\ \text{при } \omega_L < \omega_E \text{ (ДСЧ} < 0). \end{cases} \quad (8)$$

При этом используется сигнал  $V_{E_1}(t)$ .

На втором этапе используются сигнал  $V_G(t)$  с частотой, равной частоте  $V_L(t)$  при заданной начальной фазе гетеродина  $\phi$ , не равной 0, и сигнал  $V_{E_2}(t)$  с требуемой к измерению фазой равной  $\theta$ . Тогда электрическое поле на выходе ТАФМ1 имеет вид:

$$E_{\text{ТАФМ1}} = \frac{\alpha_1 E_0}{\sqrt{2}} e^{j\omega_c t} \left\{ J_{+1}(m_G, \psi_G) e^{j(\omega_G t + \phi)} - J_{-1}(m_G, \psi_G) e^{-j(\omega_G t + \phi)} \right\}, \quad (9)$$

где  $m_G$  и  $\psi_G$  – оптимальные параметры амплитудного и фазового преобразования сигнала на частоте  $\omega_G$  в модуляторах ТАФМ1.

Для измерения УП на вход ТАФМ2 необходимо подать отражённый эхосигнал  $V_{E_2}(t) = V_{E_2} \cos(\omega_E t + \theta)$ . Тогда элек-

трическое поле на выходе ТАФМ2 будет иметь вид:

$$E_{\text{ТАФМ2}} = j \frac{\alpha_2 E_0}{\sqrt{2}} e^{j\omega_c t} \left\{ J_{+1}(m_{E_2}, \psi_{E_2}) e^{j(\omega_E t + \theta)} - J_{-1}(m_{E_2}, \psi_{E_2}) e^{-j(\omega_E t + \theta)} \right\}, \quad (10)$$

где  $m_{E_2}, \psi_{E_2}$  – оптимальные параметры амплитудного и фазового преобразования сигнала со второго элемента антенны на частоте  $\omega_E$  в модуляторах ТАФМ2.

Для проведения точных измерений локационный сигнал и сигнал гетеродина должны быть настроены на одну и ту же частоту, что необходимо для фактических измерений, привязанных к локационной частоте. Тогда после прохождения излучения с выходов ТАФМ1 и ТАФМ2, ПРЛ и ПОЛ на выходе ФД получим:

$$\begin{cases} i \propto \cos[(\omega - \omega) - \theta - \phi] \\ \text{при } \omega > \omega \text{ (ДСЧ} > 0), \\ i \propto \cos[(\omega - \omega) + \theta + \phi] \\ \text{при } \omega < \omega \text{ (ДСЧ} < 0). \end{cases} \quad (11)$$

Спектральная картина измерения УП при заданной фазе гетеродина  $\phi$ , не равной 0, и фазе  $\theta$  эхосигнала со второго элемента антенны представлена на рис. 3.

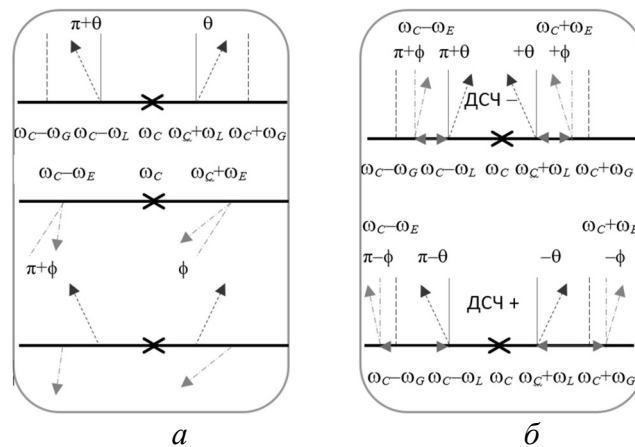


Рис. 3. Спектральная картина измерения УП: спектр на выходе ТАФМ1, ТАФМ2, ПРЛ соответственно (а); постановка задачи для ПААС по определению  $\theta$ ,  $\tau$  и УП (выход ПОЛ) (б)

Fig. 3. Spectral pattern of measuring the angle of arrival (AoA): output spectrum of TAPM1, TAPM2, PBS, respectively (a); problem setting for HSSA by determining  $\theta$ ,  $\tau$  and AoA (POL output) (b)

Значение  $\theta$  может быть получено, когда фазовый сдвиг  $\phi$ , вносимый сигналом гетеродина, известен после предварительной калибровки.

Следует отметить, что, когда  $\phi$  установлен равным  $90^\circ$ , предлагаемый двухканальный микроволновый фотонный смеситель можно рассматривать как I/Q смеситель с его известными свойствами по определению частот и фаз.

Алгоритм определения  $\theta$  заключается в получении на фотодетекторе, как на нелинейном элементе, огибающей биений двух частотных компонент  $\omega_L$  и  $\omega_E$  с начальными фазами равными 0 (на первом этапе) и  $\theta$  и  $\phi$  (на втором этапе). По информационной структуре двухчастотного сигнала можно определить его мгновенную амплитуду, частоту и фазу и вычислить их векторную сумму. Упрощённо локационный сигнал можно представить как вектор  $\vec{A}_1$ , эхосигнал – вектор  $\vec{A}_2$  вращается относительно него с условной угловой частотой  $\Omega$ , а  $\alpha_L(t) = \omega_L t + \phi$  и  $\alpha_E(t) = \omega_E t + \theta$  – их мгновенные фазы, соответственно. Найдя зависимость между мгновенными фазами каждой из двухчастотных составляющих и фазой результирующего колебания биения [32], можно определить  $\theta$ . УП  $\phi$  определяется далее по  $\tau$  из (6) и окончательно по (7). Более детально данный алгоритм будет рассмотрен во второй части статьи.

**Заключение.** В первой части статьи описана структура и принцип действия модуля для практически одновременной

оценки ДСЧ, его знака и УП на основе технологий микроволновой фотоники. Модуль собран на двух параллельных ТАФМ, разделённых по поляризации, по схеме двухканального микроволнового фотонного смесителя. Информация о знаке ДСЧ и его величине при УП, равном  $90^\circ$ , может быть рассчитана по частоте и фазе огибающей биений специально введённого гетеродинного сигнала с локационным и эхосигналом.

В отличие от других работ, введение гетеродинного сигнала с фазовым сдвигом  $\phi$  обеспечивает универсальность предлагаемой системы, с точки зрения определения знака ДСЧ, в том числе при УП с ортогонального направления. Даже если данные поступают с биссектрисы двух элементов антенны приёмника (т. е.  $\theta = 0$  градусов), всё равно можно различить направление (знак) ДСЧ, что следует из (11).

Кроме того, модуль в оптическом диапазоне оперирует на частотах, равных частоте локационного и синхронизированного с ним гетеродинного сигнала, двух эхосигналов и соответствующих им частотам биений, а не удвоенным частотам указанных сигналов, что соответствует прямым измерениям ДСЧ и УП.

Предлагаемый модуль обеспечивает надёжное решение для определения местоположения и параметров движения других объектов в реальном времени в перспективных приложениях интеллектуальных систем автономного вождения, фотонных радаров и в других областях.

#### Список источников

1. Automotive radars: a review of signal processing techniques / S. Patole, M. Torlak, D. Wang et al. // IEEE Signal Process. Mag. 2017. Vol. 34(2). Pp. 22-35.
2. Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77 GHz frequency band / J. Hasch, E. Topak, R. Schnabel et al. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2012. Vol. 60. Pp. 845-860.
3. Tang Z. and Pan S. Simultaneous measurement of Doppler-frequency shift and angle-of-arrival of microwave signals for automotive radars // Proc. Int. Topical Meeting Microw. Photon. 2019. Pp. 1-4.
4. Tian Z., Ye C., and Jin Y. Device-free indoor tracking via joint estimation of DFS and AoA using CSI amplitude // Proc. Int. Conf. Microw. Millimeter Wave Technol. 2021. Pp. 1-3.
5. Simple Photonics-Based Measurement Method for microwave DFS and AOA / Q. Jia, J. Li, L. Sun et al. // IEEE photonics journal. 2022. Vol. 14(3). Pp. 5532108.
6. Simple approach for Doppler frequency shift estimation based on a dual-polarization quadrature phase shift keying (DP-QPSK) modulator / J. Li,



W. Yu, Z. Zhang et al. // *Applied Optics*. 2020. Vol. 59(7). Pp. 2114-2120.

7. 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. Pp. 124579.

8. Xu L., Yu Y., Tang H., and Zhang X. A simplified photonic approach to measuring the microwave Doppler frequency shift // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2017. Vol. 30, pp. 246-249.

9. 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. Pp. 137-140.

10. 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.

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

12. Full-band direct-conversion receiver with enhanced port isolation and I/Q phase balance using microwave photonic I/Q mixer (invited paper) / J. Li, J. Xiao, X. Song et al. // *Chin. Opt. Lett.* 2017. Vol. 15. Pp. 010014.

13. Novel photonic approach to microwave frequency measurement using tunable group delay line / P. Wu, X. Han, Y. Gu et al. // *Chin. Opt. Lett.* 2011. Vol. 9. Pp. 081301.

14. Wideband Doppler frequency shift measurement and direction ambiguity resolution using optical frequency shift and optical heterodyning / B. Lu, W. Pan, X. Zou et al. // *Opt. Lett.* 2015. Vol. 40. Pp. 2321-2324.

15. Huang C., Chan E.H., and Albert C.B. Wideband DFS measurement using a low-frequency reference signal // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2019. Vol. 31. Pp. 1643-1646.

16. Wideband Doppler frequency shift measurement and direction discrimination based on a DPMZM / W. Chen, A. Wen., X. Li et al. // *IEEE Photon. J.* 2017. Vol. 9. Pp. 5501008.

17. Vidal B., Piqueras M.A., and Marti J. Direction-of-arrival estimation of broadband microwave signals in phased-array antennas using photonic techniques // *J. Lightwave Technol.* 2006. Vol. 24. Pp. 2741-2745.

18. Phase modulation parallel optical delay detector for microwave angle-of-arrival measurement with accuracy monitored / Z. Cao, Q. Wang, R.R. Lu et al. // *Opt. Lett.* 2014. Vol. 39. Pp. 1497-1500.

19. Chen H. and Chan E.H. Simple approach to measure angle of arrival of a microwave signal //

*IEEE Photon. Technol. Lett.* 2019. Vol. 31. Pp. 1795-1798.

20. Chen H. and Chan E.H. Photonics-based CW/pulsed microwave signal AOA measurement system // *J. Lightwave Technol.* 2020. Vol. 38. Pp. 2292-2298.

21. Photonic approach for simultaneous measurements of Doppler-frequency shift and angle-of-arrival of microwave signals / P. Li, L. Yan, J. Ye et al. // *Opt. Express*. 2019. Vol. 27. Pp. 8709-8716.

22. Huang C., Chen H., and Chan E.H. Simple photonics-based system for Doppler frequency shift and angle of arrival measurement // *Opt. Express*. 2020. Vol. 28. Pp. 14028-14037.

23. Радиофотонный метод определения доплеровского изменения частоты отражённого радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции / О. Г. Морозов, Г. А. Морозов, Г. И. Ильин и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 2 (50). С. 63-75. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.63>

24. Радиофотонный метод определения угла прихода отражённого радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции / О. Г. Морозов, Г. А. Морозов, Г. И. Ильин и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 1 (49). С. 50-62. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.50>

25. Программно-аппаратный анализатор спектра для радиофотонных устройств измерения доплеровского сдвига частоты и его знака / О. Г. Морозов, Г. А. Морозов, Г. И. Ильин и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 1 (53). С. 65-80. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.1.65>

26. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 1 (20). С. 6-42.

27. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. Синтез двухчастотного излучения и его применение в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 3. С. 84-91.

28. Радиофотонный метод измерения мгновенных частот множества радиосигналов на основе аддитивного частотного смещения с расширенным диапазоном измеряемых частот /

А. А. Иванов, О. Г. Морозов, А. Ж. Сахабутдинов, и др. // Фотон-экспресс. 2019. № 6 (158). С. 85-86

29. Морозов О.Г., Сахабутдинов А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 4. С. 535-543.

30. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т. А. Аглиуллин, В. И. Анфиногентов, Р. Ш. Мисбахов и др. // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 1. С. 6-13.

31. 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.

32. Нуреев И.И. Радиофотонные полигармонические системы интеррогации комплексированных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток. Часть 1. Радиофотонные полигармонические методы зондирования // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 3. С. 193-220.

Статья поступила в редакцию 08.08.2022; одобрена после рецензирования 30.08.2022; принята к публикации 12.09.2022

### 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 – микроволновая фотоника, радиофотонные технологии сенсорики и телекоммуникаций. Автор 455 научных публикаций и патентов. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4779-4656>

**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 365 научных публикаций и патентов. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9420-0710>

**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 355 научных публикаций и патентов. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8915-940X>

**ДЕНИСЕНКО Павел Евгеньевич** – кандидат технических наук, 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 интеррогации. Автор 50 научных публикаций и патентов. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3452-2723>

**АНДРЕЕВ Владимир Дмитриевич** – ассистент 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 25 научных публикаций и патентов. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9161-8348>

### Вклад авторов:

**Морозов О. Г.** – концептуализация, методология, написание – просмотр и редактирование, привлечение финансирования.

**Морозов Г. А.** – методология.

**Ильин Г. И.** – методология.

**Денисенко П. Е.** – математическое обеспечение, проверка, формальный анализ, моделирование, написание – просмотр и редактирование, администрация проекта.

**Андреев В. Д.** – математическое обеспечение, проверка, формальный анализ, моделирование, написание – подготовка оригинала черновика, администрация проекта.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 621.383

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.3.58>**A Simple Module for Radar Measurements of the Doppler Frequency Shift and Angle of Arrival Based on Two-Channel Polarization Tandem Amplitude-Phase Modulation. Part 1****O. G. Morozov<sup>✉</sup>, G. A. Morozov, G. I. Ilyin, P. E. Denisenko, V. D. Andreev**

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,

10, K.Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

OGMorozov@kai.ru<sup>✉</sup>**Keywords:** radio photonics; radar; Doppler frequency shift; angle of arrival; tandem amplitude-phase modulator; polarization division; reference heterodyne radio signal with a given frequency and phase**ABSTRACT**

**Introduction.** One of the new, actively developing functions of radars, necessary for providing processes of intelligent or autonomous cars, is determining the location and motion parameters of other objects in real time, which includes the simultaneous measurement of the Doppler frequency shift (DFS), as well as the angle of arrival (AoA) of the echo. Recently, due to the advantages of large instantaneous bandwidth, low transmission losses and resistance to electromagnetic interferences, a lot of methods based on radio photonics technologies have been developed to implement radio measurements of DFS and AoA in the optical range. The **aim** of the research was to develop the principle of operation of a new simple radio photonic system for simultaneous measurements of DFS and AoA, which obtains information by comparing the frequency and phase shift values, respectively, of the down-converted signals of two channels. Moreover, the use of a reference signal, the reference frequency and phase allows to get the sign of the DFS, and the AoA from the direction of a perpendicular to the line connecting two reception antennas. **Methods.** It is proposed to build a circuit of a block of modulators for measuring DFS and AoA based on tandem single-port amplitude and phase modulators (TAPM) that implement the Ilyin-Morozov single-frequency coherent radiation conversion method with complete carrier suppression and high spectral purity when the parameters of the amplitude-phase conversion deviate from the optimal ones. In the system being developed, location, reflected, and heterodyne radio signals are fed to two TAPMs, each defines one measurement channel with total carrier suppression. As a result, the DFS (including the value and sign) and the AoA can be obtained from the analysis of the signals of each channels in terms of the parameters of their beat envelope. **Conclusion.** Thus, the first part of the paper presents the principle of operation of the module, which has a very simple structure and low cost. A wide operating frequency range determined by the modulator bandwidth, and a low-frequency photodetector provide high reliability due to a simple procedure for calibrating and controlling the temperature conditions of the elements. The target characteristics expected to be achieved and which will be presented in the second part of the paper are to measure the DFS in the range of  $\pm 100$  kHz at operating frequencies of 15-40 GHz with an error of  $\pm 10$  Hz and to measure the AoA in the range from 0 to  $\pi/2$  with an error less than  $\pm 1.7$  mrad.

**Funding:** this work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state contract under the Agreement No. 075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020) and program «Prioritet-2030».

**REFERENCES**

1. Patole S., Torlak M., Wang D. et al. Automotive radars: a review of signal processing techniques. *IEEE Signal Process. Mag.* 2017. Vol. 34(2). Pp. 22-35.
2. Hasch J., Topak E., Schnabel R. et al. Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77 GHz frequency band. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2012. Vol. 60. Pp. 845-860.
3. Tang Z. and Pan S. Simultaneous measurement of Doppler-frequency shift and angle-of-arrival of microwave signals for automotive radars. *Proc. Int. Topical Meeting Microw. Photon.* 2019. Pp. 1-4.
4. Tian Z., Ye C., and Jin Y. Device-free indoor tracking via joint estimation of DFS and AoA using CSI amplitude. *Proc. Int. Conf. Microw. Millimeter Wave Technol.* 2021. Pp. 1-3.

5. Jia Q., Li J., Sun L. et al. Simple Photonics-Based Measurement Method for microwave DFS and AOA. *IEEE Photonics Journal*. 2022. Vol. 14(3). Pp. 5532108.
6. Li J., Yu W., Zhang Z. et al. Simple approach for Doppler frequency shift estimation based on a dual-polarization quadrature phase shift keying (DP-QPSK) modulator. *Applied Optics*. 2020. Vol. 59(7). Pp. 2114-2120.
7. 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. Pp. 124579.
8. Xu L., Yu Y., Tang H., and Zhang X. A simplified photonic approach to measuring the microwave Doppler frequency shift. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2017. Vol. 30, pp. 246-249.
9. Biernacki P. D., Ward A., Nichols L. T. et al. Microwave phase detection for angle of arrival detection using a 4-channel optical downconverter. *International Topical Meeting on Microwave Photonics*. 1998. Pp. 137-140.
10. 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.
11. Cao Z., van den Boom H.P.A., 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.
12. Li J., Xiao J., Song X. et al. Full-band direct-conversion receiver with enhanced port isolation and I/Q phase balance using microwave photonic I/Q mixer (invited paper). *Chin. Opt. Lett.* 2017. Vol. 15. Pp. 010014.
13. Wu P., Han X., Gu Y. et al. Novel photonic approach to microwave frequency measurement using tunable group delay line. *Chin. Opt. Lett.* 2011. Vol. 9. Pp. 081301.
14. Lu B., Pan W., Zou X. et al. Wideband Doppler frequency shift measurement and direction ambiguity resolution using optical frequency shift and optical heterodyning. *Opt. Lett.* 2015. Vol. 40. Pp. 2321-2324.
15. Huang C., Chan E.H., and Albert C.B. Wideband DFS measurement using a low-frequency reference signal. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2019. Vol. 31. Pp. 1643-1646.
16. Chen W., Wen A., Li X. et al. Wideband Doppler frequency shift measurement and direction discrimination based on a DPMZM. *IEEE Photon. J.* 2017. Vol. 9. Pp. 5501008.
17. Vidal B., Piqueras M.A., and Marti J. Direction-of-arrival estimation of broadband microwave signals in phased-array antennas using photonic techniques. *J. Lightwave Technol.* 2006. Vol. 24. Pp. 2741-2745.
18. Cao Z., Wang Q., Lu R.R. et al. Phase modulation parallel optical delay detector for microwave angle-of-arrival measurement with accuracy monitored. *Opt. Lett.* 2014. Vol. 39. Pp. 1497-1500.
19. Chen H. and Chan E.H. Simple approach to measure angle of arrival of a microwave signal. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2019. Vol. 31. Pp. 1795-1798.
20. Chen H. and Chan E.H. Photonics-based CW/pulsed microwave signal AOA measurement system. *J. Lightwave Technol.* 2020. Vol. 38. Pp. 2292-2298.
21. Li P., Yan L., Ye J. et al. Photonic approach for simultaneous measurements of Doppler-frequency shift and angle-of-arrival of microwave signals. *Opt. Express*. 2019. Vol. 27. Pp. 8709-8716.
22. Huang C., Chen H., and Chan E.H. Simple photonics-based system for Doppler frequency shift and angle of arrival measurement. *Opt. Express*. 2020. Vol. 28. Pp. 14028-14037.
23. Morozov O.G., Morozov G.A., Il'in G.I. et al. Radiofotonnyj metod opredelenija doplerovskogo izmenenija chastoty otrazhjonnoho radiolokacionnogo signala na osnove tandemnoj amplitudno-fazovoj moduljacji [Microwave photonic method for measuring doppler shift of radar echo signal with tandem amplitude-phase modulation]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series «Radio Engineering and Infocommunication Systems»]. 2021. No 2 (50). Pp. 63-75. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.63>
24. Morozov O.G., Morozov G.A., Il'in G.I. et al. Radiofotonnyj metod opredelenija ugla prihoda otrazhennogo radiolokacionnogo signala na osnove tandemnoj amplitudno-fazovoj moduljacji [Microwave photonic method for measuring the angle-of-arrival of radar echo signal with tandem amplitude-phase modulation]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series «Radio Engineering and Infocommunication Systems»]. 2021. № 1 (49). Pp. 50-62.
25. Morozov O.G., Morozov G.A., Il'in G.I. et al. Programmno-apparatnyj analizator spektra dlja radiofotonnyh ustrojstv izmerenija doplerovskogo sdviga chastoty i ego znaka [Software hardware spectrum analyzer for radio photonic devices for measuring doppler shift and its sign]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series «Radio Engineering and Infocommunication Systems»]. 2022. No 1 (53). Pp. 65-80.
26. Morozov O.G., Ilyin G.I. Amplitudno-fazovaja moduljacija v sistemah radiofotoniki [Amplitude-phase modulation in microwave photonics sys-

tems]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radio-tekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series «Radio Engineering and Infocommunication Systems»]. 2014. No 1 (20). Pp. 6-42

27. Morozov O.G., Aibatov D.L., Sadeev T.S. Sintez dvukhchastotnogo izlucheniya i ego primeneniye v volokonno-opticheskikh sistemah raspredelennykh i multipleksirovannykh izmereniy [Synthesis of two-frequency radiation and its application in fiber-optic systems of distributed and multiplexed measurements]. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of Wave Processes and Radio Systems]. 2010. Vol. 13. No 3. Pp. 84-91.

28. Ivanov A.A., Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Zh. et al. Radifotonnyy metod izmereniya mgnovennykh chastot mnozhestva radiosignalov na osnove additivnogo chastotnogo smeshheniya s rasshirennym diapazonom izmerjaemykh chastot [Radiophoton Method for Measuring Instantaneous Frequencies of Multiple Radio Signals Based on Additive Frequency Shift with an Extended Range of Measured Frequencies]. *Foton-jekspress* [Photon-express]. 2019. No 6. (158). P. 85-86.

29. Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Zh. Adresnye volokonnye brjegovskie struktury v kvaziraspredel'nykh radiofotonnykh sensorykh siste-

mah [Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems]. *Komp'yuternaya optika* [Computer optics]. 2019. Vol. 43. No 4. Pp. 535-543.

30. Agliullin T.A., Anfinogentov V.I., Misbahov R.Sh. et al. Mnogoadresnye volokonnye brjegovskie struktury v radiofotonnykh sensorykh sistemah [Multicast fiber bragg structures in microwave photonics sensor systems]. *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi* [Proceedings of Telecommunication Universities]. 2020. Vol. 6. No 1. P. 6-13.

31. Morozov O.G., Nureev I.I., Sahabutdinov A.Zh. et al. Izmerenie mgnovЕННОЙ chastoty mikrovolnovykh signalov s ispol'zovaniem tandemnoy amplitudno-fazovoy modul'jatsii v opticheskom diapazone [Measurement of the instantaneous frequency of microwave signals using tandem amplitude-phase modulation in the optical range]. *Foton-jekspress* [Photon-express]. 2019. No 5 (157). Pp. 16-24.

32. Nureev I.I. Radiofotonnye poligarmonicheskie sistemy interogatsii kompleksirovannykh datchikov na osnove volokonnykh brjegovskikh reshetok. Chast' 1. Radiofotonnye poligarmonicheskie metody zondirovaniya [Microwave photonic polyharmonic systems for interrogation of complex sensors, based on fiber Bragg gratings. Part 1. Methods of microwave photonic polyharmonic probing]. *Applied Photonics*. 2016. Vol. 3. No 3. Pp. 193-220.

The article was submitted 08.08.2022; approved after reviewing 30.08.2022; accepted for publication 12.09.2022

**For citation:** Morozov O. G., Morozov G. A., Ilyin G. I., Denisenko P. E., Andreev V. D. A Simple Module for Radar Measurements of the Doppler Frequency Shift and Angle of Arrival Based on Two-Channel Polarization Tandem Amplitude-Phase Modulation. Part 1. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2022. No 3 (55). Pp. 58–71. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.3.58>

#### Information about the authors

*Oleg G. Morozov* – Doctor of Sciences Degree in Engineering, Professor, holds a position of the Head of the Department of Radio Photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev – KAI. Research interests – microwave photonics, radio-photon technologies of sensors and telecommunications. The author of 455 scientific publications and patents. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4779-4656>

*Gennady A. Morozov* – Doctor of Sciences Degree in Engineering, Professor, Professor at the Department of Radioelectronic and Telecommunication Systems, Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev – KAI. Research interests – antennas, microwave technologies, microwave photonics. The author of 365 scientific publications and patents. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9420-0710>

*German I. Ilyin* – Doctor of Sciences Degree in Engineering, 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 355 scientific publications and patents. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8915-940X>

*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. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3452-2723>

*Vladimir D. Andreev* – assistant 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 25 scientific publications and patents. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9161-8348>

**Contribution of authors:**

*Morozov O. G.* – concept, methodology, writing - viewing and editing, fundraising.

*Morozov G. A.* – methodology.

*Ilyin G. I.* – methodology.

*Denisenko P. E.* – software, verification, formal analysis, modeling, writing - viewing and editing, project administration.

*Andreev V. D.* – mathematical support, verification, formal analysis, modeling, writing - preparation of the original manuscript, project administration.

Authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.