

РАДИОФОТОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АМПЛИТУДНОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА МАХА-ЦЕНДЕРА ДВУХПОЛОСНЫМ ДВУХЧАСТОТНЫМ ЗОНДИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ПОДАВЛЕННОЙ НЕСУЩЕЙ

О.Г. МОРОЗОВ*, РУС. Ш. МИСБАХОВ, РИН.Ш. МИСБАХОВ, В.С. СОКОЛОВ, А.А. КУЗНЕЦОВ,

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

*E-mail: OGMorozov@kai.ru

Подробную информацию об авторах см. на сайте www.fotonexpres.ru раздел «Наши авторы»

Электрооптические и оптоэлектронные устройства широко используются в телекоммуникациях, радио-фотонике, волоконной сенсорике. Измерение спектральных характеристик указанных устройств с высоким разрешением необходимо как на стадии их производства, так и эксплуатации. Однако с использованием существующих на сегодняшний день методов вряд ли можно эффективно охарактеризовать указанные устройства, практически обладающие произвольным откликом, в силу низкого разрешения или высокой стоимости существующих средств измерений. В данной статье будут использованы основные принципы концепции сверх узкополосного пакета дискретных частот для построения радиофотонного анализатора спектральных характеристик (РФАСХ) амплитудного электрооптического модулятора Маха-Цендера, основанного на двойном преобразовании лазерной несущей в симметричное двухчастотное излучение по методу Ильина-Морозова, и характеризующегося высоким разрешением при низкой стоимости. При этом в отличие от существующих РФАСХ предложенная реализация отличается универсальной элементной базой, обоснованным выбором разностной частоты между двумя составляющими в 50 МГц, определяющей разрешающую способность измерений, а также получением на выходе информационного сигнала, привязанного к нулю.

Ключевые слова: радиофотоника; амплитудный электрооптический модулятор Маха-Цендера; относительная частотная характеристика; сверхузкополосный пакет дискретных частот; метод Ильина-Морозова; двухполосное двухчастотное зондирующее излучение с подавленной несущей.

ВВЕДЕНИЕ

Электрооптические (ЭОУ) и оптоэлектронные (ОЭУ) устройства, такие как модуляторы и фотоприемники, играют ключевую роль в оптической связи [1], радиофотонике [2] и волоконно-оптической сенсорике [3]. Измерение их спектральных характеристик имеет важное значение при изготовлении и применении этих устройств, потому что практически все важные параметры, такие как полуволновое напряжение и индекс модуляции устройств ЭОУ, полоса пропускания и чувствительность ОЭУ, вносимые потери, групповая задержка и хроматическая дисперсия связывающих их телекоммуникационных волокон характеризуют всю систему, в которой они применяются, в целом.

Для характеристики амплитудных электрооптических модуляторов с произвольным откликом, которые выбраны нами как предмет исследования данной статьи, предлагается несколько методов, основанных на использовании оптического анализатора спектра (ОСА) [4] и интерферометрии [5]. Однако метод на основе ОСА имеет низкое разрешение, а при реализации методов интерферометрии на измерительные характеристики влияют механические вибрации и тепловые флуктуации. Для преодоления этих проблем предлагаются методы, основанные на двухтональной модуляции [6] и преобразовании фазовой модуляции в модуляцию интенсивности [7]. Но эти методы требуют сложных и сверхдорогих стабильных по частоте систем для их реализации. Компромиссным вариантом является использование модуляционного анализатора оптических компонент (АОК), универсального для определения характеристик ЭОУ и ОЭУ. Однако коммерческие АОК не могут измерять устройства с произвольным откликом. Кроме того, АОК использует модулированный по интенсивности сигнал для измерения оптических устройств, что при этом вызывает наложение частотных характеристик боковых полос ± 1 -го порядка.

Широкополосные амплитудные электрооптические модуляторы Маха-Цендера (АЭО ММЦ) являются базовыми компонентами магистральных оптических систем связи, радиофотонных систем процессинга и сенсорики. Спектральная характеристика АЭО ММЦ с высоким разрешением по частоте имеет большое значение для повышения производительности указанных систем и должна быть охарактеризована с высокой точностью и разрешением до его применения. Недавно для улучшения точности и разрешения были предложены радиофотонные методы, основанные на многочастотной модуляции [8], оптической однополосной модуляции [9-10] и линейно-частотной модуляции [11], но динамический диапазон при их реализации относительно низок.

Для достижения измерений с высоким разрешением по частоте спектральная характеристика модулятора чаще всего измеряется путем подачи на него сканирующего одночастотного микроволнового сигнала и анализа выходного сигнала после преобразования в широкополосном калиброванном фотоприемнике (КФП). Рабочая полоса пропускания КФП должна перекрывать интересующий диапазон частот, а калибровка необходима, чтобы получить собственную частотную характеристику модулятора [8-10].

Для упрощения процесса измерения был предложен метод с самокалибровкой, основанный на гетеродинировании [11-13]. В этом методе желаемые компоненты оптического спектра переносятся в радиодиапазон, что облегчает измерение с высокими точностью и разрешением. Этот метод позволяет снизить требования к полосе пропускания КФП примерно наполовину и позволяет избежать калибровки его неравномерной частотной характеристики. Чтобы дополнительно снизить требования к ширине полосы КФП, был предложен метод двухчастотной модуляции для достижения измерения частотной характеристики высокоскоростных АЭО ММЦ с использованием узкополосного КФП [14]. В этом методе измерение с самокалибровкой реализуется посредством низкочастотного КФП, но за счет использования двух микроволновых генераторов.

Недавно был предложен радиофотонный метод измерения частотной характеристики широкополосного ММЦ с самокалибровкой, основанный на модуляции в нем двух несущих и использовании КФП с узкополосным фильтром на выходе [15]. По сравнению с методом гетеродинирования требования к полосе пропускания КФП значительно снижены. По сравнению с методом двухчастотной модуляции требуется только один перестраиваемый микроволновый источник в виде электронного анализатора цепей. Однако, для его реализации используется дополнительный акустооптический модулятор и интерферометрическая схема для формирования двухчастотной несущей, выбор разностной частоты между ее компонентами в 100 МГц, определяющей разреша-

ющую способность измерений, не обоснован, а их амплитуды, как правило, не одинаковы, что приводит к необходимости измерения информационного сигнала с учетом плавающей постоянной составляющей.

Выходом из создавшегося положения может быть применение сверх узкополосного дискретного пакета частот (СПДЧ), как нового типа зондирующего излучения [16-18]. СПДЧ, содержащий две и более частотные компоненты с фиксированными разностными частотами, максимальная из которых подобрана таким образом, что при прохождении такого излучения через исследуемое устройство, изменение амплитуд всех гармоник происходит пропорционально одной и той же величине, а минимальная – превышает спектральную ширину лазера, при этом начальные фазы каждой из компонент строго детерминированы, а их разность известна. Реализованные выше требования к СПДЧ позволяют: исследовать ЭОУ и ОЭУ с произвольными спектральными характеристиками как симметричным, так и асимметричным профилем; исключить необходимость обработки постоянной составляющей сигнала; анализировать сигнал на выходе фотоприемника на фиксированных и заранее известных разностных частотах. В общем случае число компонент, их начальные амплитуды, фазы и шаг частот могут быть произвольными (но известными). Для анализа в данной статье будем использовать частный случай СПДЧ – двухчастотное зондирующее излучение, полученное по методу Ильина-Морозова [19] и вариант его реализации на базе АЭО ММЦ [20], аналогичного тестируемому.

Цель настоящей статьи – разработка радиофотонного анализатора спектральных характеристик (РФАСХ) АЭО ММЦ, основанного на двойном преобразовании несущей в симметричное двухчастотное излучение по методу Ильина-Морозова, и характеризующегося высоким разрешением при низкой стоимости.

В калиброванном АЭО ММЦ формирования зондирующего сигнала излучение несущей частоты первый раз преобразуется в симметричное двухчастотное с малой разностной частотой (50 МГц), выбранной в соответствии с требованиями концепции СПДЧ. Затем в тестируемом АЭО ММЦ зондирующий сигнал преобразуется в двухполосное двух-частотное излучение на частоте сканирования его спектральной характеристики, которое далее поступает на КФП и анализируется с целью получения искомой спектральной характеристики на разностной частоте. Таким образом, можно охарактеризовать не только амплитудные АЭО ММЦ, но и большинство других ЭОУ и ОЭУ, например, фотоприемники.

Предлагаемый метод использует технологии построения [15] на основе самокалибровки по отношению к сигналу реперной частоты в 1 ГГц, а также позволяет использовать КФП с выходным узкополосным фильтром, настроенным

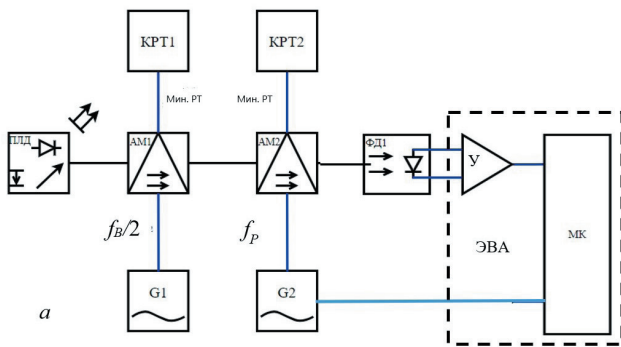


Рис. 1 – Радиофотонный анализатор спектральных характеристик: структурная схема (а); выходное излучение ПЛД (б); выходное излучение АМ1 (в); выходное излучение АМ2 (г); выходной радиосигнал КФП

на разностную частоту зондирующего сигнала. При этом в отличие от [15] его реализация отличается универсальной элементной базой, обоснованным выбором разностной частоты в 50 МГц, определяющей разрешающую способность измерений, а также получением на выходе информационного сигнала, привязанного к нулю. Последнее определяется абсолютным равенством амплитуд компонент соответственно зондирующего и сканирующего двухполосного двухчастотного излучений.

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ РФАСХ АЭО ММЦ

На рис. 1,а представлена структурная схема РФАСХ для демонстрации метода контроля спектральных характеристик тестируемого АЭО ММЦ.

Непрерывное лазерное излучение (рис. 1,б) с амплитудой E_C и несущей частотой f_C поступает с перестраиваемого лазерного диода (ПЛД) с распределенной обратной связью на калиброванный АЭО ММЦ (АМ1), работающий в «нулевой» точке модуляционной характеристики для достижения двухполосной модуляции на разностной частоте f_B (генератор G1) с подавленной несущей. На выходе АМ1 генерируются нижняя боковая полоса на частоте $f_C - f_B/2$, несущая частота f_C , подавленная до уровня 25-30 дБ в силу конструктивных особенностей модулятора, и верхняя боковая полоса на частоте $f_C + f_B/2$ (рис. 1,в). Полученное, практически двухчастотное излучение поступает далее на тестируемый АЭО ММЦ (АМ2), также работающий в «нулевой» точке модуляционной характеристики, для достижения двухполосной модуляции на частотах зондирования модулятора f_p с подавленной несущей. На выходе тестируемого АМ2 генерируются нижняя боковая полоса на двух частотах $f_C - f_p \pm f_B/2$, верхняя боковая полоса на двух частотах $f_C + f_p \pm f_B/2$, в состав которых также входят подавленные до уровня 25-30 дБ частоты $f_C \pm f_B/2$ (рис. 1,в). Несущая частота f_C также формирует две составляющие на частотах $f_C \pm f_p$, которые в силу малости амплитуды несущей и дополнительного влияния коэффициента модуляции, также как и саму несущую на выходе тестируемого АМ2, дополнительно подавленную на 25-30 дБ, можно не учитывать.

Обе боковые полосы несут информацию о спектральной характеристике исследуемого модулятора в области частоты зондирования f_p . После фотосмешения на выходе КФП ФД1 генерируется составляющая на разностной частоте f_B (рис. 1,г), мощность которой является откликом тестируемого АМ2 на частоте f_p . Следовательно, сканируя частоту зондирования f_p с помощью генератора G2 можно получить спектральный отклик тестируемого АМ2 на фиксированной низкочастотной компоненте, равной разностной частоте f_B . Относительный частотный отклик тестируемого АМ2 может быть вычислен нормировкой мощности полученных сигналов к мощности сигнала на реперной частоте f_R , которая, как правило равна 1 ГГц [15].

Математически, лазерное излучение на выходе калиброванного АМ1 с учетом малости амплитуды подавленной несущей может быть описано, следующим выражением:

$$E_{outB} = -jE_C e^{j2\pi f_C t} \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z_B) \sin(2k+1)(f_B/2)t \right], \quad (1)$$

где z_B пропорционально коэффициенту амплитудной модуляции $m_B(f_B/2)$ калиброванного модулятора на частоте $f_B/2$.

На выходе тестируемого АМ2 аналогично получим

$$E_{outP} = -jE_C e^{j2\pi f_C t} \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z_p) \sin(2k+1)(f_B/2)t \right] \times \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z_p) \sin(2k+1)f_p t \right], \quad (2)$$

где z_p пропорционально коэффициенту амплитудной модуляции $m_P(f_p)$ тестируемого модулятора на частоте f_p .

Ток на выходе фотодетектора можно описать с помощью разложения Якоби-Ангера с выделением искомого составляющих на частоте f_B

$$I \propto \Re(f) E_{outP}^* E_{outB} = = \gamma E_C^2 \left\{ 2 \Re(f=f_B) J_1(m_B(f_B/2)) J_1(m_P(f_p)) \cos(2\pi f_B t + \varphi) + \left[\sum_n \Re_n(f=0) + \sum_{n,m} \Re(f=nf_p \pm mf_B/2) \right] \right\}, \quad (3)$$

где $J_1(m_B(f_B/2))$ и $J_1(m_P(f_p))$ функции Бесселя 1-го рода и 1-го порядка, определяющие амплитуду искомого частотных компонент, $\Re(f)$ спектральный отклик КФП ФД1.

Используя разложение функций Бесселя в ряд получим значение фототока для частоты f_p , полученное на разностной частоте f_B :

$$I_{f_p}(f_B) = 2\gamma E_C^2 \Re(f=f_B) m_B^2(f_B/2) m_P^2(f_p). \quad (4)$$

В итоге, нормируя (4) к фототоку для реперной частоты f_R , получим относительный спектральный отклик тестируемого АМ2:

$$S_{21}(f_p) = I_{f_p}(f_B) / I(f_R)(f_B) = m_p^2(f_p) / m_p^2(f_R). \quad (5)$$

Из (5) видно, что полученный относительный спектральный отклик тестируемого АМ2 может быть измерен с помощью предложенного метода, заключающегося в формировании зондирующего двухполосного двухчастотного сигнала с подавленной несущей, разовом сканировании характеристики модулятора и регистрации информационного сигнала на фиксированной низкой разностной частоте в фотодетекторе с калибровкой по реперному значению.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проверки работоспособности предлагаемого метода был проведен макетный эксперимент в диапазоне до 8,5 ГГц. В макете использован ПЛД на C+L диапазон (Quantifi Photonics), настроенный на длину волны 1550,108 нм для генерации непрерывного излучения мощностью 10 дБм. В качестве калиброванного и тестируемого АЭО ММЦ использованы коммерческие амплитудные модуляторы с полосой до 10 ГГц (MXAN-LN-10), напряжение смещения постоянного тока которого точно регулировалось с помощью контроллера рабочей точки (KPT1 и KPT2, рис. 1,а) MBS-AN-LAB (iXBlue) для достижения двухполосной модуляции с подавленной несущей. Выходной модулированный оптический сигнал тестируемого АМ2 преобразовывался с помощью КФП ФД1 Р40А (Aric). Калиброванный электронный векторный анализатор цепей FSH8 (R&S) использовался для генерации одночастотного микроволнового сигнала с частотным сканированием, подаваемого на АМ2 и для измерения мощности восстановленного сигнала на разностной частоте f_B .

Обоснованный выбор значения разностной частоты f_B сводится к определению по рис. 2 точки пересечения кривых шумовой характеристики типового ФД и разрешающей способности измерений (в первом приближении для симметричного двухчастотного зондирующего сигнала она равна разностной частоте СПДЧ) и составил 50 МГц.

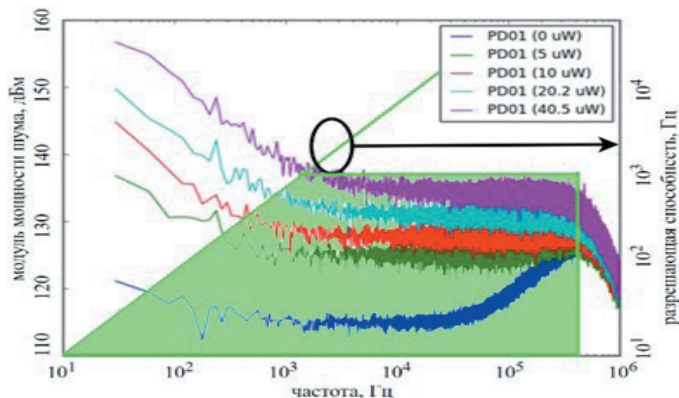


Рис. 2 – К выбору разностной частоты зондирования РФАСХ

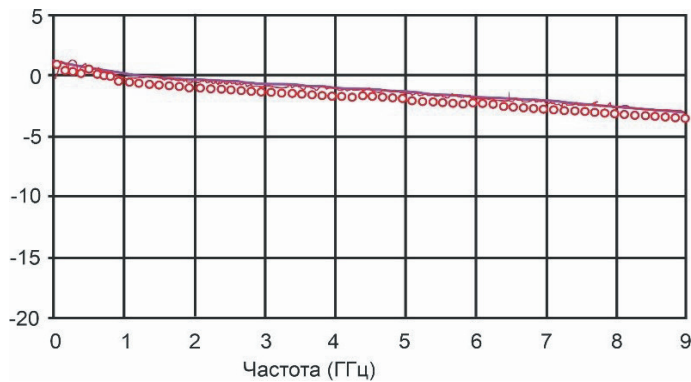


Рис. 3 – Относительная частотная характеристика S21 тестируемого АЭО ММЦ

На рис. 3 представлена измеренная относительная частотная характеристика тестируемого АЭО ММЦ S21(дБ), на которой красная линия, фиолетовая линия и красные кружки обозначают результаты измерений, полученные с использованием метода изготовителя, его фиттинга и предлагаемого метода соответственно в избранных точках.

Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что предложенный метод применим для определения частотной характеристики ММЦ с высоким разрешением.

Фактически, оптическая несущая не может быть полностью подавлена в АЭО ММЦ из-за ограниченного коэффициента ослабления (обычно в диапазоне 20-30 дБ для коммерческих модуляторов), который может быть вызван несимметричной архитектурой интерферометра Маха-Цендера. Следовательно, уровень не до конца подавленной несущей неизбежно вносит погрешность измерения в предлагаемый метод. При измерении коэффициент подавления несущей может еще больше уменьшиться по сравнению с показанным на рис. 1, в из-за дрейфа смещения постоянного тока и относительно низкого индекса модуляции.

Однако при повторном преобразовании в АМ2 ее значение уменьшается еще на 20-30 дБ, что позволяет существенно снизить ее влияние на погрешность измерений.

Кроме того, в отличие от метода прототипа [15] амплитуда составляющих зондирующего излучения одинакова, что позволяет проводить его обработку без контроля постоянной составляющей сигнала биений, поскольку он всегда привязан к нулю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мы предложили и экспериментально продемонстрировали новый подход измерения относительной частотной характеристики широкополосных АЭО ММЦ, основанный на модуляции двухполосным двухчастотным излучением с подавленной несущей и низкочастотной регистрацией огибающей их биений на разностной частоте, обоснованный выбор которой составил 50 МГц, что и определило разрешающую способность подхода. Благодаря ис-

пользованию двухкратного преобразования несущей частоты по методу Ильина-Морозова, который является частным случаем СПДЧ этот метод позволяет получить относительную частотную характеристику АЭО ММЦ с высокой точностью. В результате экспериментов был исследован диапазон в 8,5 ГГц для АЭО ММЦ МХАН-LN-10, который был ограничен рабочим диапазоном применяемого ЭВА FSH8. Предлагаемый подход позволяет измерять характеристики модуляторов и фото-приемников с полосой 40 ГГц в соответствующей конфигурации экспериментального стенда. За счет использования перестраиваемого лазерного источника можно измерить относительную частотную характеристику АЭО ММЦ на разных длинах волн, что устраняет эффект усреднения, вызванный его широким спектром.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения программы «Приоритет – 2030».

ЛИТЕРАТУРА

- Morozov O., Nureev I., Sakhabutdinov A., et al. Ultrahigh-Resolution Optical Vector Analyzers // *Photonics*. - 2020. - V. 7. - № 1. - P. 14.
- Yao J. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms: special issue on optical pulse shaping, arbitrary waveform generation, and pulse characterization // *Optics Communications*. - 2011. - V. 284. - № 15. - P. 3723-3736.
- Yao J. Optoelectronic oscillators for high speed and high resolution optical sensing // *Journal of Lightwave Technology*. - 2017. - V. 35. - № 16. - P. 3489-3497.
- Shi Y.Q., Yan L.S., Willner A.E. High-speed electrooptic modulator characterization using optical spectrum analysis // *J. Lightwave Technol.* - 2003. - V. 21. - № 10. - P. 2358-2367.
- Wu X.M., Man J.W., Xie L., et al. Novel method for frequency response measurement of optoelectronic devices // *IEEE Photonics Technol. Lett.* - 2012. - V. 24. - № 7. - P. 575-577.
- Wu X.M., Man J.W., Xie L., et al. A new method for measuring the frequency response of broadband optoelectronic devices // *IEEE Photonics J.* - 2012. - V. 4. - № 5. - P. 1679-1685.
- Hale P.D., Williams D.F. Calibrated measurement of optoelectronic frequency response // *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* - 2003. - V. 51. - № 4. - P. 1422-1429.
- Jungerman R.L., Dolfi D.W. Frequency domain optical network analysis using integrated optics // *IEEE J. Quantum Electron.* - 1991. - V. 27. - № 3. - P. 580-587.
- Zhu N.H., Chen C., Pun E.Y.B., et al. Extraction of intrinsic response from S-parameters of laser diodes // *IEEE Photonics Technol. Lett.* - 2005. - V. 17. - № 4. - P. 744-746.
- Zhang S.J., Wang H., Zou X.H., et al. Calibration-free electrical spectrum analysis for microwave characterization of optical phase modulators using frequency-shifted heterodyning // *IEEE Photon. J.* - 2014. - V. 6. - № 4. - P. 5501008.
- Wang H., Zhang S.J., Zou X.H., et al. Self-calibrated and extinction ratio-independent microwave characterization of electrooptic Mach-Zehnder modulators // *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* - 2017. - V. 27. - № 10. - P. 948-950.
- Wang H., Zhang S.J., Zou X.H., et al. Calibration-free and bias-drift-free microwave characterization of dual-drive Mach-Zehnder modulators using heterodyne mixing // *Opt. Eng.* - 2015. - V. 55. - № 3. - P. 031109.
- Zhang S.J., Zhang C., Wang H., et al. Calibration-free measurement of high-speed Mach-Zehnder modulator based on low-frequency detection // *Opt. Lett.* - 2016. - V. 41. - № 3. - P. 460-463.
- Ma Y.X., Zhang Z.Y., Zhang S.J., et al. Self-calibrating microwave characterization of broadband Mach-Zehnder electro-optic modulator employing low-speed photonic down-conversion sampling and low-frequency detection // *J. Lightwave Technol.* - 2019. - V. 37. - № 11. - P. 2668-2674.
- Zhang Z.Y., Lyu W., Liu Y. et al. Relative frequency response measurement of Mach-Zehnder modulators utilizing dual-carrier modulation and low-frequency detection // *Optics Express*. - 2022. - V. 30. - № 16. - P. 285569-28576.
- Кузнецов А.А. Концепция построения радиофотонных оптических векторных анализаторов нового типа // *Электроника, фотоника и киберфизические системы*. - 2021. - Т. 1. - № 1. - С. 47-55.
- Кузнецов А.А. Сравнительная оценка способов формирования излучений в виде сверхузкополосного пакета дискретных частот // *Инженерный вестник Дона*. - 2021. - № 9. - С. 8.
- Kuznetsov A.A. Optical vector analyzers for multiplicative fiber optic sensors probing. formulation of the problem // *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. - 2021. - P. 5.
- Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиодетекции // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. - 2014. - № 1 (20). - С. 6-42.
- Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. А.С. СССР 1477130. Двухчастотный лазерный излучатель // *Заявитель КАИ им. А.Н. Туполева; заявл. 03.03.86; опубл. 20.07.2004. Бюлл.* - 2004. - № 20.

Концептуализация М.О.Г.; методология М.О.Г., К.А.А.; тематическое обеспечение, проверка, формальный анализ, моделирование С.В.С.; написание – подготовка оригинала черновика С.В.С.; написание – просмотр и редактирование М.О.Г.; анализ приложений и привлечение финансирования М.Рин.Ш., М.Рус.Ш.; администрирование проекта К.А.А. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.