EDN: BFVLUS
УДК 621.38 *2.2.6*

КОМБИНИРОВАННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ОСНОВ ШИРОКОПОЛОСНОГО И СВЕРХУЗКОПОЛОСНОГО ПАКЕТОВ ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТОТ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПАКТНЫХ РАДИОФОТОННЫХ АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНЫХ АМПЛИТУДНЫХ МОДУЛЯТОРОВ МАХА-ЦЕНДЕРА И ФОТОДЕТЕКТОРОВ. ЧАСТЬ IV. РАДИОФОТОННЫЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНЫХ АМПЛИТУДНЫХ МОДУЛЯТОРОВ МАХА-ЦЕНДЕРА НА ОСНОВЕ ДВУХПОЛОСНОГО ЧЕТЫРЕХЧАСТОТНОГО ЗОНДИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО УМНОЖЕНИЕМ СПЛИТТИРОВАННОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ ЧАСТОТЫ

Али М. Аль-Муфти, В.С. Соколов, Рус.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов

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

Аннотация. Целью настоящей работы, состоящей из четырех частей, является решение задач комбинированного применения основ теории широкополосного и сверхузкополосного пакетов дискретных частот (ШПДЧ и СПДЧ) для совершенствования метрологических характеристик, минимизации структуры и снижения стоимости радиофотонных анализаторов спектральных характеристик (РФАСХ) широкополосных амплитудных модуляторов Маха-Цендера (ШАММЦ) и фотодетекторов (ШФД), реализованных на импортозамещающей элементной базе. В первой части работы рассмотрены вопросы формирования симметричного двухполосного двухчастотного зондирующего излучения (ДДЗИ) с подавленной несущей и равными амплитудами компонент, составляющих основу ШПДЧ, и оцениваются его функциональные и системные характеристики, необходимые для достижения цели работы. Во второй части работы представлены основы анализа ДДЗИ, преобразованного в ШФД через оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой (ОФНЛХ), с помощью простого по структуре радиофотонного интеррогатора, существенно отличающегося по принципу действия от ЭВА и позволяющего снизить стоимость РФАСХ в целом за счет исключения последнего. На примере симметричного ДДЗИ синтезированного на основе умножения сканирующей частоты и принципов радиофотонной интеррогации с ОФНЛХ в третьей части работы показаны принципы построения РФАСХ ШФД с ушестерением диапазона измерения АЧХ. В настоящей, четвертой части работы, на примере симметричного двухполосного четырехчастотного зондирующего излучения, как варианта двухполосного многочастотного зондирующего излучения (ДМЗИ), синтезированного на основе умножения сплиттированной сканирующей частоты, и принципов радиофотонной интеррогации с ОФНЛХ показаны принципы построения РФАСХ ШАММЦ с утроением диапазона измерения АЧХ и получением данных для ее построения на выходе калиброванного ШФД с двух узкополосных фильтров на одинарной и утроенной частотах сплиттирования. Последняя выбирается в соответствии с требованиями теории СПДЧ из условий, учитывающих ширину линии излучения лазера и шумовую характеристику фотодетектора, разрешающую способность измерений и ширину радиочастотной составляющей сигнала биений.

Ключевые слова: широкополосный амплитудный модулятор Маха-Цендера, сплиттированная сканирующая частота; радиофотонный анализатор спектральных характеристик; умножение частоты; широкополосный пакет дискретных частот; сверхузкополосный пакет дискретных частот; радиофотоника; радиофотонный интеррогатор.

1. Введение

Для расширения диапазона измерения АЧХ ШАММЦ в два раза и формирования АЧХ с помощью узкополосного фотодетектора или узкополосного фильтра на выходе ШФД, настроенного на частоту сигнала биений между компонентами, разнесенными на фиксированную частоту предложен ряд методов [1-5]. Один из них наиболее близкий основан на использовании частотной составляющей биений оптической несущей и гармоники зондирующего излучения второго порядка с применением двух СВЧ-генераторов формирующих амплитудно-модулированное (АМ) зондирующего излучения [3]. Наличие нелинейных гармоник в выходном излучении тестируемого ШАММЦ не способствует повышению точности контроля, а наличие в детектируемом ШФД АМ-излучении постоянной составляющей приводит к существенному снижению отношения сигнал/шум измерений.

Отметим, что сложность реализации предложенного метода определяется использованием зондирующего излучения, составляющие которого симметричны относительно частоты несущего излучения, но не одинаковы по амплитуде на разных гармониках. Поэтому основное внимание в настоящей работе уделено развитию симметричных методов зондирования с равными по амплитуде компонентами и подавленной несущей, позволяющих повысить коэффициент модуляционного преобразования мощности несущей в компоненты боковых полос и увеличить отношение сигнал/шум в ходе процесса контроля АЧХ. За базовый принят метод на базе двух, калиброванном и тестируемом ШАММЦ [4], который будет усовершенствован до метода с использованием одного модулятора.

В работе впервые предложен метод контроля АЧХ ШАММЦ на основе симметричного ДМЗИ с подавленными несущей и четырьмя поднесущими, с равными амплитудами компонент, представляющих одночастотные нечетные гармоники модулирующей частоты, выбранных на основе рекомендаций теории ШПДЧ, сформированных с использованием особенностей функций Бесселя, определяющих модуляционные характеристики одновременно формирующего ДЧЗИ и тестируемого ШАММЦ, с его дальнейшим сканированием с шагом, равным разрешающей способности анализатора по частоте, выбранным на основе рекомендаций теории СПДЧ и отличающийся от известных простотой реализации, высокими точностью и разрешающей способностью контроля и возможностью расширения диапазона контроля АЧХ ШФД в три и более раза при использовании узкополосных фильтров на заданных первой и третьей гармониках частоты сплиттирования, формируемой в калиброванном двухчастотном СВЧ-генераторе.

2. Принцип действия и структурная схема радиофотонного анализатора спектральных характеристик широкополосных амплитудных электрооптических модуляторов Маха-Цендера с формирователем двухполосного многочастотного зондирующего излучения на основе умножения сплиттированной сканирующей частоты

Следует отметить, что основной недостаток метода, изложенного в третьей части данной работы, учет суммарных частот биений различных гармоник, может быть исключен при сплиттировании частотных составляющих [3].

Этот метод приемлем для контроля АЧХ ШАММЦ и может быть применен с использованием преимуществ метода умножения частоты, что и будет показано в данном разделе. Для этого необходимо применить микроволновое параллельное возбуждение ШАММЦ, который выступает как тестируемое устройство и одновременно как формирователь ДЧЗИ. Фактически можно говорить о новом методе самотестирования АЧХ ШАММЦ, при этом необходимы только калиброванные лазер и широкополосный ШФД с узкополосными фильтрами, настроенными на гармоники частоты сплиттирования.

Для демонстрации метода контроля спектральных характеристик, тестируемого ШАММЦ, с параллельным радиочастотным формирователем ДЧЗИ на рис. 1 представлена структурная схема РФАСХ.

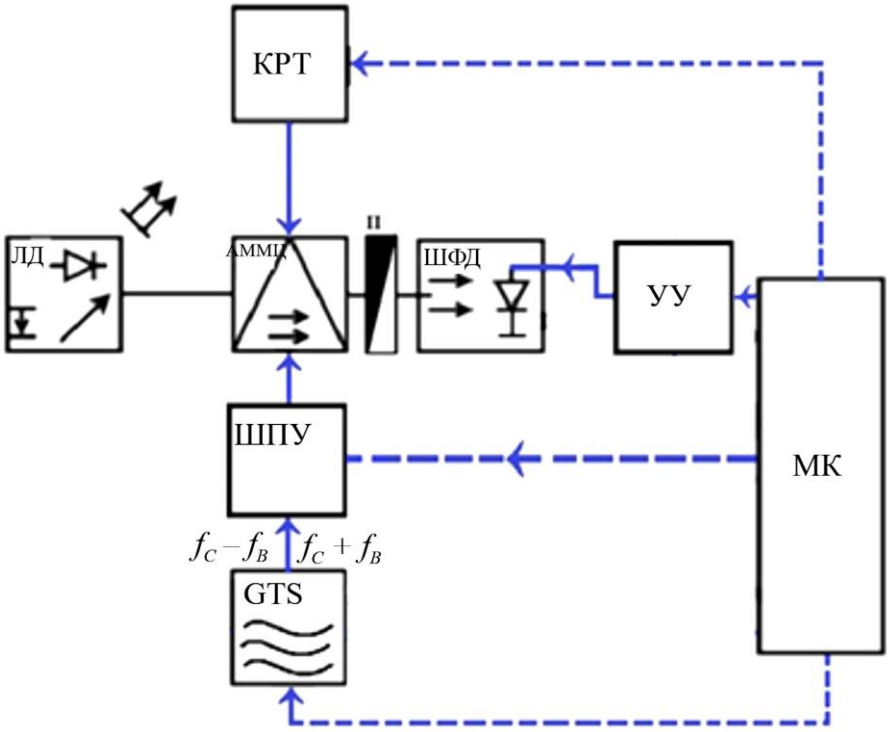


Рис. 1. Структурная схема радиофотонного анализатора АЧХ ШАММЦ:
КРТ – контроллер рабочей точки; ЛД – перестраиваемый лазерный диод; АММЦ – широкополосный калиброванный АММЦ; П – поляризатор; ШФД – широкополосный тестируемый ФД; ШПУ – широкополосный усилитель; МК – микроконтроллер; ОФНЛХ – оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой; УУ – узкополосный усилитель с фильтрацией; GTS – генератор сканирующего двухчастотного сигнала

Для пояснения принципа работы схемы на рис. 2 представлены спектрограммы оптических излучений на выходе ЛД (*а*); модулирующего двухчастотного радиочастотного колебания, сформированного генератором двухчастотного сигнала (GTS) на компонентах опорной f_B и сканирующей f_S частот (*б*); тестируемого ШАММЦ (*в*), работающего в МІТВ для формирования в нем же ДЧЗИ.

Непрерывное лазерное излучение (рис. 2, *а*) с амплитудой E_C и несущей частотой f_C поступает с ЛД с распределенной обратной связью на ШАММЦ (АММЦ), работающий в МІТВ. Выбирается параметр модуляции m = 3,105. ШАММЦ модулируется двухчастотным микроволновым сигналом с разносом частот $2f_B$ (рис. 2, *б*), который может быть получен с модуля двухтоновой модуляции микроволнового генератора сканирующей частоты или синтезирован в МК.

Для примера приведем спектрограмму, полученную с модуля микроволнового генератора сканирующей частоты Agilent (рис. 3).

Этим достигается формирование ДЧЗИ в группах на 1-ой и 3-ей гармониках частоты сканирования nf_S, которые подавлены (рис. 2, *в*), а вокруг них сформированы боковые полосы двухчастотного радиосигнала, разнесенные на частоты $2nf_B$, равные n-й гармонике удвоенной частоты сплиттирования.

Ток на выходе фотодетектора можно описать с помощью разложения Якоби-Ангера с выделением искомых составляющих на частоте $2nf_B$ (рис. 2, *г*):

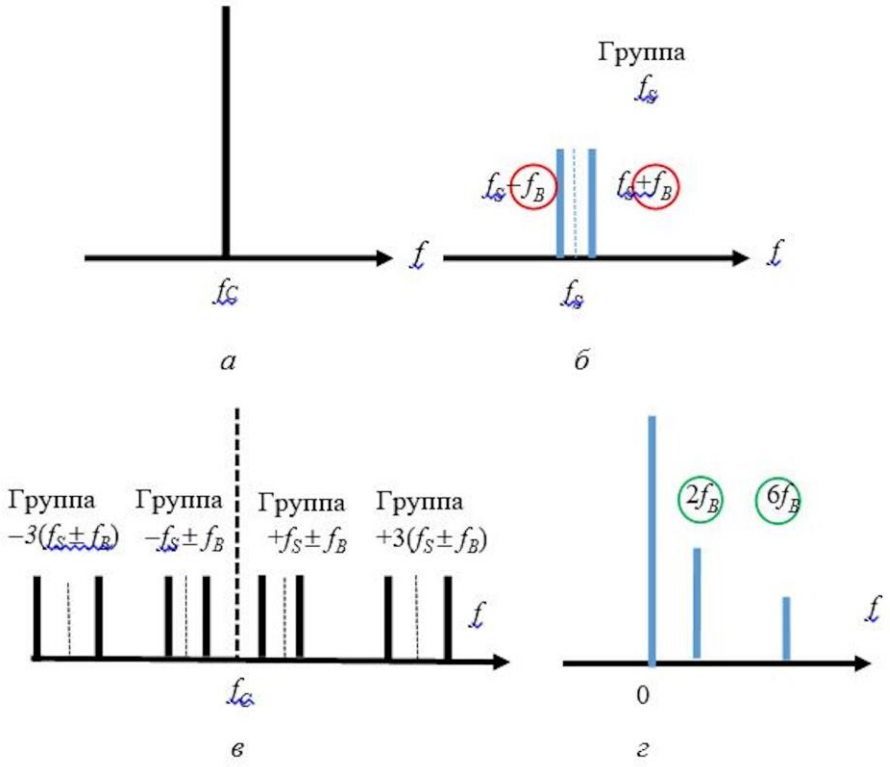


Рис. 2. Спектрограммы (*а*, *в*) и условия (*б*) формирования ДМЗИ для мониторинга АЧХ ШАММЦ, спектрограмма информационных сигналов радиодиапазона для построения его АЧХ (*г*)

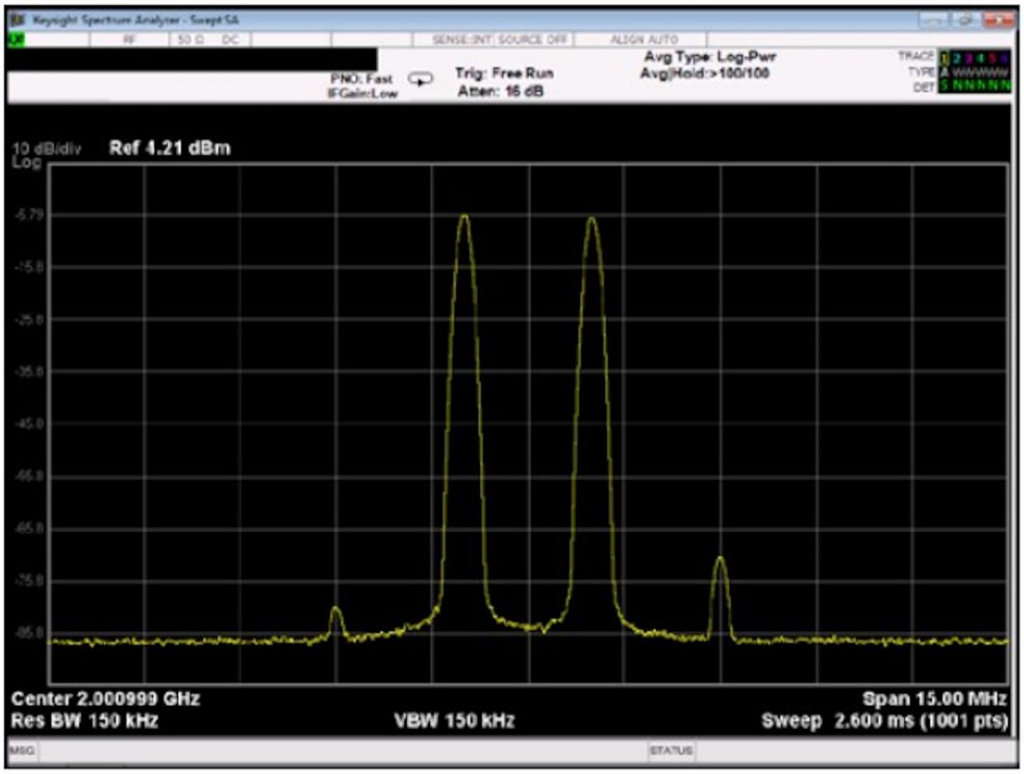


Рис. 3. Двухчастотный сигнал с центральной частотой 2 ГГц и разностной частотой 300 кГц (пример)

$$I \propto \Re\left(nf_B\right)E_{\text{outP}}E_{\text{outP}}^{*} = \\ = \gamma E_C^2\left\{\begin{array}{c} 2\Re\left(f = nf_B\right)J_n\left(m_B\left(nf_B\right)\right)J_n\left(m_S\left(f_S\right)\right)\cos\left(2\pi nf_B t + \varphi\right) + \\ + \sum_n \Re_n\left(f = 0\right) + \sum_{n,m}\Re\left(f = nf_s \pm nf_B\right) \end{array}\right\}, \quad (1)$$

где $J_n\left(m\left(nf_B\right)\right)$ и $J_n\left(m_s\left(nf_s\right)\right)$ – функции Бесселя 1-го рода n-го порядка, определяющие амплитуду искомых частотных компонент; n = 1,3; $\Re\left(nf_B\right)$ – спектральный отклик КФП УФД.

В итоге, нормируя (1) к фототоку для реперной частоты f_R, получим относительный спектральный отклик тестируемого ШАЭОММЦ:

$$S_{21}\left(nf_S\right) = I_{nf_s}\left(nf_B\right)/I_{f_R}\left(f_B\right) = m_s^2\left(nf_s\right)/m_s^2\left(f_R\right), \quad (2)$$

где $n = 1,3$.

Из (2) видно, что полученный относительный спектральный отклик тестируемого ШАММЦ может быть измерен с помощью предложенного метода, заключающегося в формировании зондирующего двухполосного четырехчастотного излучения с подавленной несущей, разовом сканировании характеристики модулятора и регистрации информационного сигнала на фиксированной низкой частоте в узкополосном калиброванном фотодетекторе с нормировкой по реперному значению.

3. Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований был выбран стенд, представленный во второй части работы. На выходе ШФД были установлены узкополосные фильтры на частоты $2nf_B$. Сканирование осуществлялось в диапазоне от 1 до 5 ГГц с шагом и разрешением в 50 МГц. Сплиттирование выбиралось с частотой МГц. Ширину полосы исследуемых ШАММЦ определяли в полном диапазоне частот 30 ГГц.

В качестве импортного модулятора был взят модулятор интегрально-оптический сверхвысокочастотный MXLAN-LN-40.

Относительная АЧХ приведена на рис. 4.

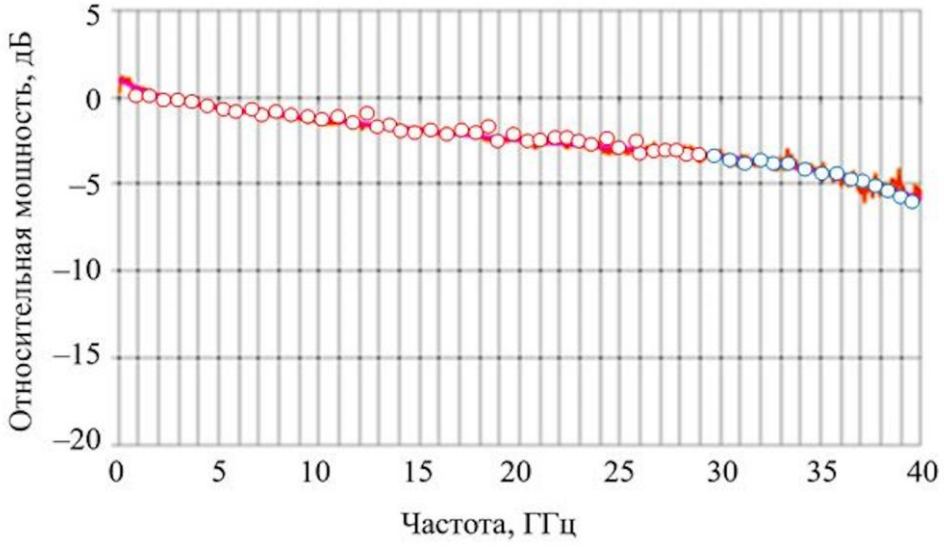


Рис. 4. Относительная АЧХ тестируемого модулятора MXLAN-LN-40

Точки измерения (кружки красного цвета) показаны с шагом 500 МГц. Кружки синего цвета получены при работе ШАММЦ в точке параметр модуляции m = 3,105, что позволило увеличить диапазон измерений до 50 ГГц.

В качестве импортозамещающего модулятора был взят модулятор интегрально-оптический сверхвысокочастотный IMMODUL-AM-40 (ЛЛС). Измерения проводились в аналогичных условиях.

Относительная АЧХ приведена на рис. 5.

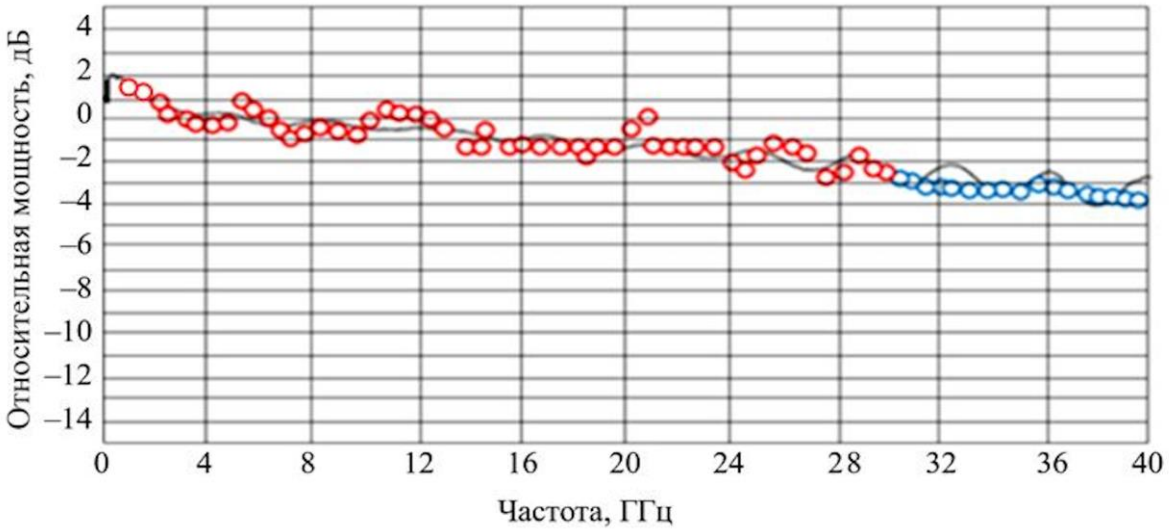


Рис. 5. Относительная АЧХ импортозамещающего модулятора IMMODUL-AM-40

Результаты, представленные на рис. 4 и рис. 5, показывают, что предложенный метод применим для определения АЧХ ШАММЦ с высоким разрешением, которое определяется характеристиками либо РФИ, либо шириной линии излучения лазера при использовании управления от МК.

Далее приведем рекомендации по построению импортозамещающих РФАСХ и используемой в них элементной базы отечественного производства.

4. Интегральный передающий модуль LT 40A со встроенным абсорбционным модулятором (ЛЛС)

LT40A (рис. 6) [6] – модуль высокоскоростного оптоволоконного передатчика, подходящий как для систем связи со скоростью до 40 Гбит/с, так и для приложений RF-over-Fiber, включая удаленное подключение антенн, фазированные решетки и широкополосные линии задержки. Вход RF устройства обеспечивается через коннектор (2,4 мм (40 ГГц) или 3,5 мм (20 ГГц)). Изделие рекомендуется использовать с фотоприемниками серии P40A.

Передающий модуль, выполненный на базе DFB лазера со встроенным и абсорбционным модулятором TEC, имеет ударопрочный и герметичный корпус. Ключевые особенности:

- диапазон частот от 10 МГц до 40 ГГц;
- длина волны 1,3 мкм;
- компактный размер.

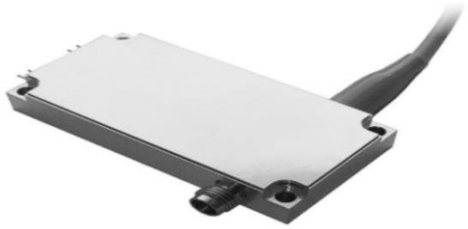


Рис. 6. Малошумящий фотоприемный модуль LT40A

Технические параметры модуля приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технические параметры LT40A

Параметр		
Наименование	Значение	Единица измерения
Рабочий диапазон частот	От 10 до 40	ГГц
Длина волны	1,3	мкм
Несущая длина волны	1310	нм
Выходная оптическая мощность	03.окт	мВт
Радиус изгиба волокна	20	мм
Диапазон рабочих температур	−40…+85	°C
Температура хранения	−40…+85	°C

Непосредственное применения модуля LT40A в разработанных РФАСХ, представленных в третьей и четвертой частях, невозможно в силу отличия абсорбционных модуляторов от электрооптических, но для реализации результатов, полученных в прототипах [5], они могут быть использованы для замены первых каскадов модуляции на ШАММЦ с фиксированными частотами опорной и разнесенной частот, как импортозамещающий элемент.

5. Заключение

В четвертой части работы была решена задача исследования и разработки РФАСХ ШАММЦ, построенного на основе минимизации его структуры до одного лазера, модулятора и фотоприемника и управлением с помощью одного радиочастотного сигнала со сплиттированием и использованием метода умножения частоты в однопортовом модуляторе.

При анализе АЧХ ШАММЦ достигнуты утроение диапазона измерения, основанное на формировании ДЧЗИ на особенностях модуляционной характеристики тестируемого ШАММЦ. АЧХ ШАММЦ в частотном диапазоне 30 ГГц были получены с помощью компонент сканирования с шагом 50 кГц, частотой сканирования до 10 ГГц и с реперной частотой 1 ГГц. При дальнейших исследованиях и использовании умножения частоты в 5 раз при тех же параметрах сканирования может быть достигнут диапазон измерений в 50 ГГц, что будет свидетельствовать об упятерении диапазона измерений по сравнению с диапазоном сканирования. АЧХ ШАММЦ в частотном диапазоне до 40 ГГц были получены с помощью компонент сканирования с шагом 50 кГц и реперной частотой 1 ГГц.

Можно предположить, что проведенные измерения нечувствительны к смещению рабочей точки ММЦ, потому что они основаны на измерении относительных амплитуд, а не по абсолютной амплитуде ДЧЗИ. По сравнению с обычным гетеродинным методом, метод обеспе-

чивает очень узкую ширину линии компонент ДЧЗИ из-за полностью когерентных оптических боковых полос и обеспечивает самокалибровку без коррекции изменения мощности ДЧЗИ. При этом ширина полосы сигнала биений компонент в радиодиапазоне не превышает 10 Гц.

В отличие от существующих устройств достигнута упрощенная структура анализатора на базе одного универсального лазера, модулятора и широкополосного фотодетектора с двумя или тремя узкополосными фильтрами по гармоникам удвоенной частоты сплиттирования, что делает анализаторы экономически эффективными для практического применения.

Кроме того, формирование ДЧЗИ применимо для различных уровней зондирования и рабочих длин волн. АЧХ на радиочастотах были получены из мощности продуктов биений компонент ДЧЗИ, соотнесенных к значениям мощности реперной частоты. Новые анализаторы АЧХ ШАММЦ с минимизацией структуры и расширением диапазона измерений представляют собой простое, недорогое и надежное решение, преодолевающее недостатки известных решений.

Их преимущества могут стать более существенными при построении анализатора по технологиям микроволновых фотонных интегральных схем, особенно при условиях влияния внешних климатических факторов. Следует отметить и возможность применения указанных схем в других областях радиофотоники: для измерения неизвестных оптических и микроволновых частот, что также существенно для практики широкополосных линий волоконно-оптической и радиофотонной связи [7-9], радиолокации и радионавигации [10-11].

Список литературы

1. Соколов В.С., Мальцев А.В., Морозов О.Г. и др. Анализатор амплитудно-частотных характеристик широкополосных электрооптических и оптоэлектронных устройств с минимизацией структуры и расширением диапазона измерений // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2023. – № 1. – С. 74-88.

2. Соколов В.С., Морозов О.Г., Морозов Г.А. и др. Средство измерения относительной частотной характеристики электрооптического модулятора радиофотонным методом // Материалы X Молодежной МНТК молодых ученых, аспирантов и студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2023». – 2023. – С. 51-56.

3. Соколов В.С., Морозов О.Г., Морозов Г.А. и др. Радиофотонный модуль измерения относительной частотной характеристики амплитудного электрооптического модулятора // Сборник статей X Всероссийской научной школы-семинара «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцевого и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами». – 2023. – С. 418-423.

4. Qi G., Yao J., Seregelyi J. et al. Phase-Noise Analysis of Optically Generated Millimeter-Wave Signals With External Optical Modulation Techniques // Journal of Lightwave Technology. – 2006. – Vol. 24. – No. 12. – Pp. 4861-4875.

5. Coral J.L., Martin J., Fuser J.M. General Expression for IM/DD Dispersive Analog Optical Links With External Modulation or Optical Up-conversion in a Mach-Zehnder Electrooptical Modulator // Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2001. – Vol. 49. – No. 10. – Pp. 1968-1976.

6. Product Specification. Fiber-Optic Transmitter Module LT40A. АО «ЛЛС». URL: https://lenlasers.ru/upload/iblock/b37/Fiber_Optic-Transmitter-Module-_-Product-Specification.pdf (дата обращения 02.02.2025).

7. Морозов О.Г., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж. и др. Измерение мгновенной частоты микроволновых сигналов с использованием тандемной амплитудно-фазовой модуляции в оптическом диапазоне // Фотон-экспресс. – 2019. – № 5(157). – С. 16-24.

8. Иванов А.А., Морозов О.Г., Сахабутдинов А.Ж. и др. Радифотонный метод измерения мгновенных частот множества радиосигналов на основе аддитивного частотного смещения с расширенным диапазоном измеряемых частот // Фотон-экспресс. – 2019. – № 6(158). – С. 85-86.

9. Ivanov A., Morozov O., Sakhabutdinov A. et al. Photonic-assisted Receivers for Instantaneous Microwave Frequency Measurement Based on Discriminators of Resonance Type // Photonics. – 2022. – Vol. 9. – P. 754.

10. Морозов О.Г., Морозов Г.А., Ильин Г.И. и др. Радиофотонный метод определения доплеровского изменения частоты отраженного радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2021. – № 2(50). – С. 63-75.

11. Морозов О.Г., Морозов Г.А., Ильин Г.И. и др. Радиофотонный метод определения угла прихода отраженного радиолокационного сигнала на основе тандемной амплитудно-фазовой модуляции // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2021. – № 1(49). – С.50-62.

COMBINED APPLICATION OF BROADBAND AND ULTRA-NARROWBAND DISCRETE FREQUENCY PACKETS FUNDAMENTALS FOR CREATING COMPACT MICROWAVE PHOTONIC ANALYZERS OF BROADBAND AMPLITUDE MACH-ZEHNDER MODULATORS AND PHOTODETECTORS SPECTRAL CHARACTERISTICS.
PART IV. MICROWAVE PHOTONIC ANALYZER OF SPECTRAL CHARACTERISTICS FOR WIDEBAND AMPLITUDE MACH-ZENDER MODULATORS BASED ON DUAL-BAND FOUR-FREQUENCY PROBING RADIATION OBTAINED BY FREQUENCY MULTIPLICATION OF SPLITTED SCANNING FREQUENCY

Ali M.Al-Mufti, V.S. Sokolov, Rus.Sh. Misbakhov, O.G. Morozov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. The objective of this work, consisting of four parts, is to solve the problems of combined application of the principles of wideband (WBDFP) and ultra-narrowband (UNBDFP) discrete frequency packages for improving the metrological characteristics, minimizing the structure and reducing the cost of microwave photonic spectral characteristic analyzers (MPSCA) for wideband electro-optic modulators and photodetectors, implemented on the import-substituting element base. The first part considers the issues of forming a dual-band dual-frequencies probing radiation (DDPR) with a suppressed carrier and equal component amplitudes, which form the basis of a WBDFP, and evaluates its functional and system characteristics necessary to achieve the purpose of the work. The second part of the work presents the principles of analyzing a DDPR converted into a wideband photodetector, based on a simple in structure microwave photonic interrogator, which differs significantly in the operating principle from an EVA and allows to reduce the cost of a MPSCA as a whole due to the exclusion of the latter. The principles of constructing the MPSCA for the wideband photodetector with a sixfold increase in the measurement range of the frequency response and obtaining data for its construction at the output of the tested photodetector from two narrow-band filters at single and tripled splitting frequencies are shown in the third part of the work using the example of the symmetrical dual-band two-frequency probing radiation, as a variant of the dual-band multifrequency probing radiation (DMFPR), synthesized based on the multiplication of the split scanning frequency and the principles of the radio-photonic interrogation with the OFNLC. The present, fourth part of the work, using the example of the symmetrical dual-band four-frequency probing radiation, as a variant of the DMFPR, synthesized based on the

multiplication of the split scanning frequency and the principles of the microwave photonic interrogation with the OFNLC, shows the principles of constructing the MPSCA of the WBAMMZ with a threefold increase in the measurement range of the frequency response and obtaining data for its construction at the output of the calibrated WBPD from two narrow-band filters at single and tripled splitting frequencies. The latter is selected in accordance with the requirements of the UNBDFP theory from the conditions taking into account the width of the laser radiation line and the noise characteristic of the photodetector, the resolution of the measurements and the width of the radio-frequency component of the beat signal.

Keywords: broadband Mach-Zehnder amplitude modulator, splitted scanning frequency; microwave photonic spectrum analyzer; frequency multiplication; broadband discrete frequency package; ultra-narrowband discrete frequency package; microwave photonics; microwave photonic interrogator

Статья представлена в редакцию 15.03.2025