

КОМБИНИРОВАННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ОСНОВ ШИРОКОПОЛОСНОГО И СВЕРХУЗКОПОЛОСНОГО ПАКЕТОВ ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТОТ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПАКТНЫХ РАДИОФОТОННЫХ АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНЫХ АМПЛИТУДНЫХ МОДУЛЯТОРОВ МАХА-ЦЕНДЕРА И ФОТОДЕТЕКТОРОВ.

ЧАСТЬ III. РАДИОФОТОННЫЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНЫХ ФОТОДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ МНОГОЧАСТОТНОГО ЗОНДИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО УМНОЖЕНИЕМ 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 широкополосного и сверхузкополосного пакетов дискретных частот (ШПДЧ и СПДЧ) для совершенствования метрологических характеристик, минимизации структуры и снижения стоимости радиофотонных анализаторов спектральных характеристик (РФАСХ) ШАММЦ и ШФД, реализованных на импортозамещающей элементной базе. В первой части рассмотрены вопросы формирования 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, на основе 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 двухполосного двухчастотного излучения синтезированного на основе умножения сканирующей частоты и принципов радиофотонной интеррогации в данной, третьей части работы показаны принципы построения РФАСХ ШФД с ушестерением диапазона измерения АЧХ.

Ключевые слова: широкополосный фотодетектор, радиофотонный анализатор спектральных характеристик; умножение частоты; широкополосный пакет дискретных частот; радиофотоника; радиофотонный интеррогатор.

1. Введение

Для расширения диапазона измерения АЧХ ШФД в два раза предложен ряд усовершенствованных методов [1-2]: за счет использования частотной составляющей биений оптической несущей и гармоники зондирующего излучения второго порядка [1], двухчастотного анализатора с использованием фильтра для выделения однополосного двухчастотного излучения и его дальнейшего преобразования в двухполосное [2]. Наличие нелинейных гармоник в зондирующем излучении не способствует повышению точности контроля, а оптического фильтра – миниатюризации и системной интеграции. Кроме того, наличие дополнительных устройств вызывает большие вносимые потери, которые необходимо компенсировать оптическим усилителем, что снижает отношение сигнал/шум измерений и надежность анализаторов.

Отметим, что сложность реализации предложенных методов определяется использованием зондирующего излучения, составляющие которого несимметричны относительно частоты несущего излучения, генерируемого высокостабильным одночастотным лазером анализаторов АЧХ и имеют неравные амплитуды. 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 ШАММЦ [3], который будет усовершенствован до метода с использованием одного модулятора.

В работе впервые предложен метод контроля АЧХ ШФД на основе симметричного ДДЗИ или двухполосного многочастотного зондирующего излучения (ДМЗИ) с подавленной несущей и с равными амплитудами компонент, представляющих одночастотные нечетные гармоники модулирующей частоты, сформированных с использованием особенностей функций Бесселя, определяющих модуляционные характеристики одного калиброванного ШАММЦ, с его дальнейшим сканированием с шагом, равным разрешающей способности анализатора по частоте и отличающийся от известных простотой реализации, высокими точностью и разрешающей способностью контроля и возможностью расширения диапазона контроля АЧХ ШФД в шесть и более раз при использовании одного одночастотного узкополосного калиброванного СВЧ-генератора.

2. Принцип действия и структурная схема радиопотонного анализатора спектральных характеристик широкополосных фотодетекторов с формирователем двухполосного многочастотного зондирующего излучения на основе однопортового модулятора Маха – Цендера с умножением сканирующей частоты

На рис. 1 приведена структурная схема анализатора для демонстрации метода построения АЧХ тестируемого ШФД с формирователем многочастотного зондирующего излучения на основе умножения сканирующей частоты.

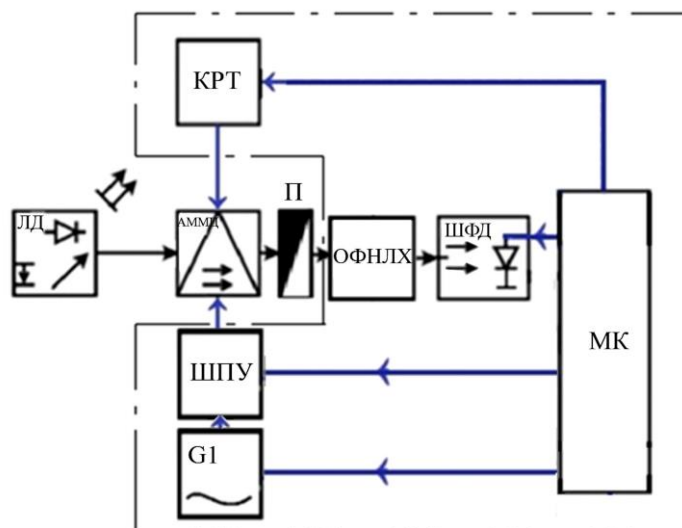


Рис. 1 – Структурная схема анализатора:

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; G1 – генератор радиочастотный сканирующий

На рис. 2 представлены спектрограммы формирования ДМЗИ и информационного сигнала радиодиапазона для построения АЧХ тестируемого ШФД.

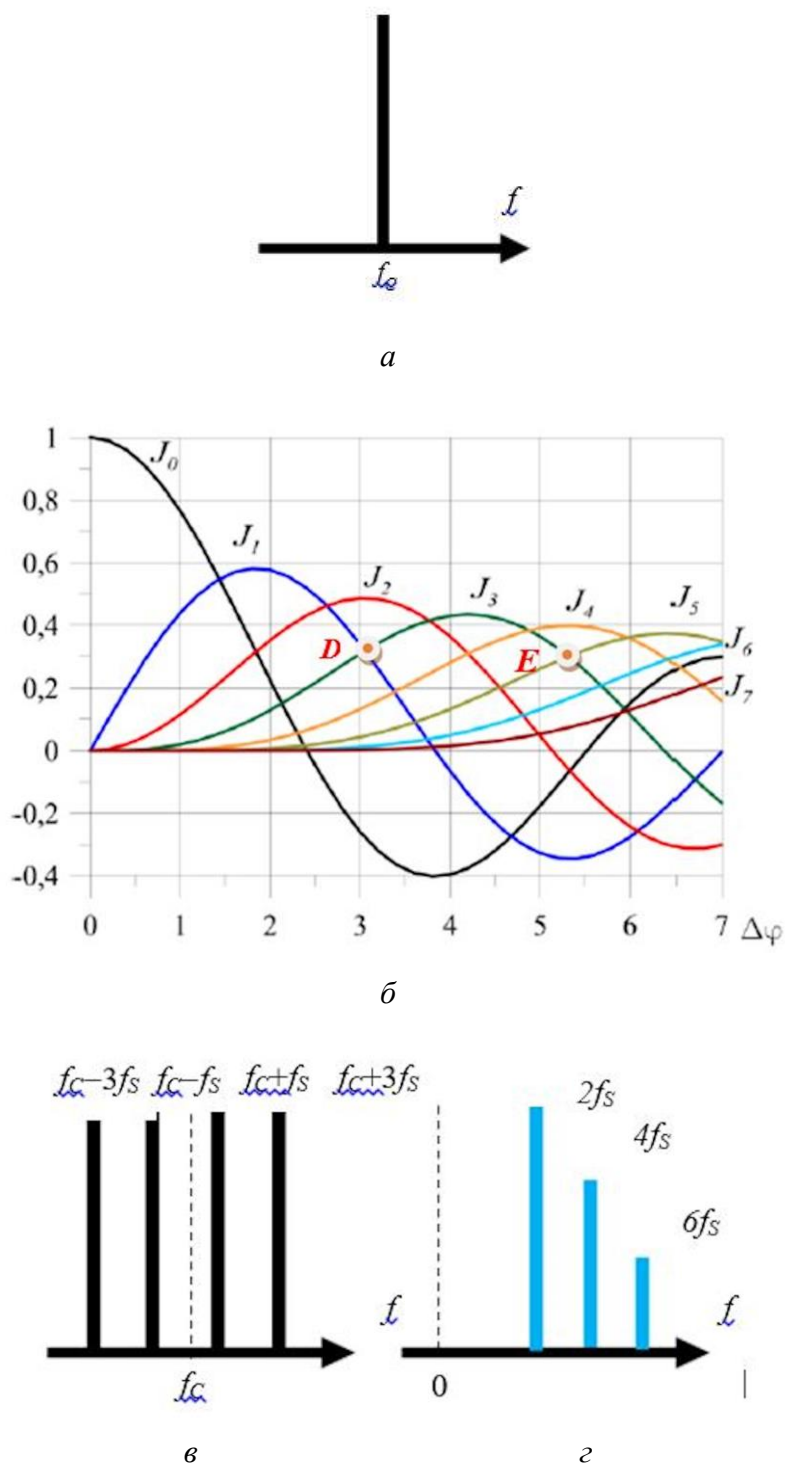


Рис. 2. Спектрограммы (а, б) и условия (б) формирования ДМЗИ для мониторинга АЧХ ШФД, спектрограмма информационных сигналов радиодиапазона для построения его АЧХ (в)

Непрерывное лазерное излучение (рис. 2, а) с амплитудой E_c и несущей частотой f_c поступает с лазерного диода (ЛД) с распределенной обратной связью на модулятор однопортовый широкополосный АММЦ для формирования ДМЗИ с подавленной несущей, работающий в ми-

нимальное пропускание по интенсивности (МИТВ) и управляемый радиочастотным сигналом на частоте f_s (генератор G1).

Как известно, функция Бесселя является определяющей при формировании частотных характеристик однопортового АММЦ. Для построения ДМЗИ используется особенность функции Бесселя 1-го рода, имеющая равные значения для функций 1-го и 3-го порядков (точка D, рис. 2, б) при аргументе X , равном 3,102. При использовании электронного векторного анализатора цепей в качестве генератора, между ВАЦ, который используется как задающей частоту должен стоять широкополосный усилитель и тогда сканирование происходит не на частоте 30 ГГц, а 5 ГГц. На выходе АММЦ формируется ЧЧЗИ, состоящее из нижней и верхней боковых полос на частотах $f_c \pm f_s$ и $f_c \pm 3f_s$. Несущая частота f_c подавлена до уровня 30-50 дБ в силу конструктивных особенностей модулятора (см. рис. 2, в).

Полученное ДМЗИ поступает далее на ШФД. Обе боковые полосы после фотосмещения позволяют получить информацию о спектральной характеристике исследуемого ШФП в трех точках $2f_s$, $4f_s$ и $6f_s$ для одного измерения с помощью радиофотонного интеррогатора (РФИ) (см. рис. 2, з).

Мощность указанных составляющих является откликом тестируемого ШФД. Следовательно, сканируя частоту зондирования f_s с помощью генератора G1, можно получить полную АЧХ тестируемого ШФД. При этом диапазон сканирования составит от 0 до f_s , а диапазон измерений от 0 до $6f_s$, где $6f_s$ должно быть соизмеримо с шириной полосы пропускания ШФД и может быть увеличено при использовании параметра модуляции $X = 5,31$ (точка E) и $X = 7,02$ [3].

В случае выбора аргумента $X = 5,31$ спектр зондирующего излучения будет состоять из двухполосного трехчастотного излучения, имеющего равные значения для функций 1-го, 3-го и 5-го порядков (точка E, см. рис. 2, б), в каждой из которых находится группа из трех излучений на частотах $f_c - 5f_s$; $f_c - 3f_s$; $f_c - f_s$ (нижняя боковая полоса) и $f_c + 5f_s$; $f_c + 3f_s$; $f_c + f_s$ (верхняя боковая полоса). Составляющие на частотах f_c будут подавленными при работе однопортового АММЦ в МИТВ (точка минимального пропускания). Обе боковые полосы после фотосмещения позволяют получить информацию о спектральной характеристике исследуемого ШФП в пяти точках $2f_s$; $4f_s$; $6f_s$; $8f_s$; $10f_s$. Такое решение позволяет увеличить диапазон измерений в 10 раз больший, чем диапазон сканирования. Выделение этих частот биений можно осуществлять с помощью радиофотонного интеррогатора.

Для описания математической модели выберем случай двухполосного двухчастотного излучения с ущемлением диапазона измерений АЧХ.

Лазерное излучение на выходе калиброванного ШАММЦ с учетом малости амплитуды, подавленной несущей математически может быть описано следующим выражением:

$$E_{\text{out}} = -jE_C e^{j2\pi f_c t} \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(m) \sin(2k+1)(2\pi f_s) t \right], \quad (1)$$

где m – коэффициент модуляции калиброванного модулятора.

При $m = 3,102$ получим:

$$E_{\text{out}} = -jE_C e^{j2\pi f_c t} \left[J_1(m) \sin 2\pi f_s t + J_3(m) \sin 6\pi f_s t - \right. \\ \left. - J_1(m) \sin 2\pi f_s t - J_3(m) \sin 6\pi f_s t \right]. \quad (2)$$

Ток на выходе фотодетектора можно описать с помощью разложения Якоби – Ангера, выделяя искомые составляющие на частоте $n f_{RF}$:

$$I \propto \Re(f_s) E_{\text{out}} E_{\text{out}}^* = E_C^2 \left\{ \begin{aligned} &6\Re(2f_s) J_1(m) \cos(4\pi f_s t) + \\ &+ 4\Re(4f_s) J_1(m) \cos(8\pi f_s t) + \\ &+ 2\Re(6f_s) J_1(m) \cos(12\pi f_s t) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где $\Re(nf_s)$ – спектральный отклик ШФД на частоте nf_s , где $n \in [1, 3]$, определяемый при учете всех компонент биений, которых будет соответственно 4, 2 и 1. При этом учтем, что $J_1(m) = J_3(m)$, а в каждой компоненте.

Относительная АЧХ тестируемого ШФД может быть вычислен по отношению каждого слагаемого (3) к значению отклика на максимальной частоте сканирования $f_s = 5$ ГГц, которую назовем также реперной. При этом может быть исследована АЧХ ШФД с полосой пропускания 30 ГГц. $\Re(f_s)$ может быть получен в ходе каждого периода сканирования при использовании $m = 3,105$ (точка D, см. рис. 2, б).

Учитывая (3), получим:

$$P(2f_{SR}) \sim \frac{1}{2} \Re^2(2f_{SR}) R_{\text{ШФД}}; \quad (4)$$

$$\Re(2f_s) \sim \sqrt{\frac{P(2f_s)}{3P(2f_{SR})}}; \quad (5)$$

$$\Re(4f_s) \sim \sqrt{\frac{P(4f_s)}{2P(2f_{SR})}}; \quad (6)$$

$$\Re(6f_s) \sim \sqrt{\frac{P(6f_s)}{P(2f_{SR})}}; \quad (7)$$

где в (4) $R_{\text{ШФД}}$ – нагрузка тестируемого ШФД и мощность тестируемого фотоприемника на частоте $P(2f_{SR})$; в (5)-(7) дан отклик тестируемого фотоприемника на частотах $2f_s$, $4f_s$, и $6f_s$ соответственно.

Из формул (4)-(7) видно, что АЧХ тестируемого ШФД может быть получена с помощью предложенного метода, заключающегося в формировании ДМЗИ с подавленной несущей, разном сканировании f_s в диапазоне от 0 до f_{SR} и регистрации информационных сигналов на частотах биений ее компонент $2f_s$, $4f_s$ и $6f_s$ на выходе фотодетектора с самокалибровкой по реперной частоте f_{SR} .

3. Экспериментальные исследования

Для проверки работоспособности предлагаемого РФАСХ ШФД был проведен макетный эксперимент в диапазоне до 0-30 ГГц при диапазоне сканирования 0-5 ГГц с использованием стенда, описанного во второй части работы, где ЭВАЦ используется как задающий сканирующий генератор, а значения АЧХ регистрируются РФИ.

При ушестерении диапазона измерений (30 ГГц) диапазон сканирования (5 ГГц) перекрывает его полностью.

Калиброванный ЭВАЦ FSH8 (R&S) использовался для генерации одночастотного микроволнового сигнала с частотным сканированием, подаваемого на АММЦ, и совместно с ШПУ для обеспечения и контроля коэффициента модуляции $m = 3,102$.

Для измерения мощности восстановленных из ДМЗИ сигналов биений на разностных частотах $2f_s$, $4f_s$ и $6f_s$ был выбран РФИ, в качестве тестируемого использовался импортный ШФД P50A (Aric) и импортозамещающий ШФД P40A (ЛЛС).

Обоснованный выбор значения шага частоты f_s сводился к определению точки пересечения кривых шумовой характеристики типового ШФД и разрешающей способности измерений и составил с учетом ширины линии излучения лазера 50 МГц. Данный выбор был сделан на основе рекомендаций теории сверхузкополосного пакета дискретных частот (СПДЧ) [6]. При использовании сверхузкополосного лазера (доли кГц) шаг сканирования может быть определено частотами 0,5-5 кГц [5].

На рис. 3 и рис. 4 представлены измеренные относительные АЧХ тестируемых ШФД, на которых красные кружки обозначают результаты измерений, полученные с использованием предложенного метода, а сплошная линия – с помощью метода векторного анализатора завода-изготовителя [7-8].

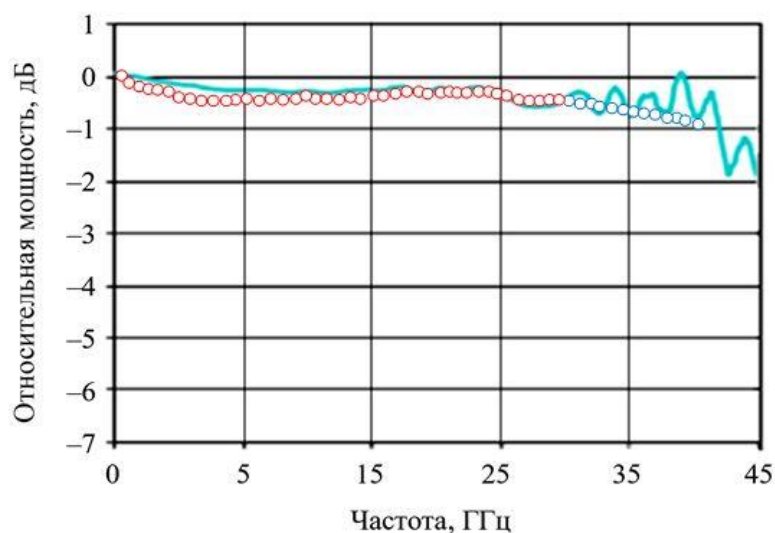


Рис. 3. Относительная АЧХ тестируемого ШФД P50A (Aric)

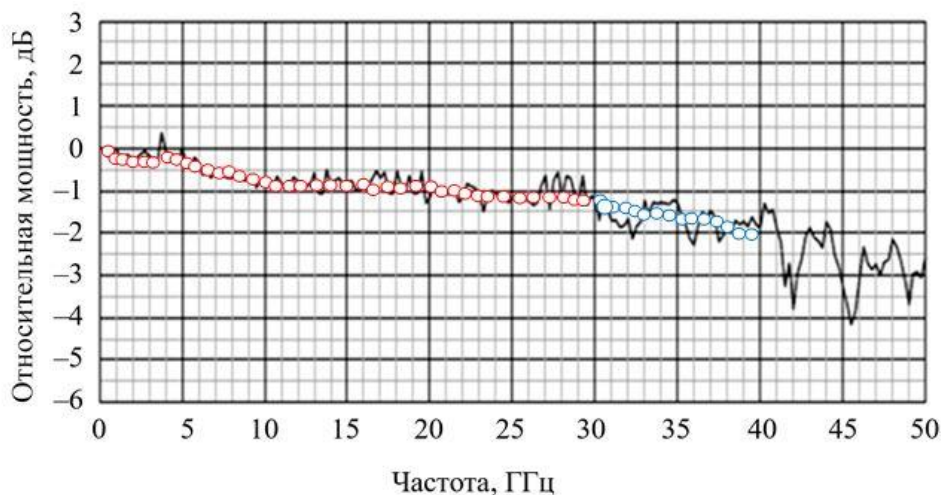


Рис. 4. Относительная АЧХ импортозамещающего ШФД P40A (ЛЛС)

Реперная частота составляла 5 ГГц.

Сканирование осуществлялось в диапазоне от 0,1 до 5 ГГц с шагом и разрешением в 50 МГц. Ширину полосы импортозамещающего ШФД определяли в полном диапазоне частот 30 ГГц. Точки измерения (кружки красного цвета) показаны с шагом 500 МГц, кружки синего цвета (рис. 3) получены при работе АММЦ в точке E , что позволило увеличить диапазон измерений до 40 ГГц при расширении диапазона сканирования до 7 ГГц.

В качестве импортозамещающего широкополосного фотодетектора был взят модуль Р40А (ЛЛС), который является высокоскоростным микроволновым фотодиодным модулем. Относительная АЧХ приведена на рис. 4.

Результаты, представленные на рис. 3 и рис. 4, показывают, что предложенный метод применим для определения АЧХ ШФД с высоким разрешением, которое определяется характеристиками либо РФИ, либо шириной линии излучения лазера при использовании управления от МК.

4. Заключение

Метод модуляции с подавлением несущей и умножением частоты сканирования позволяет извлечь АЧХ ШФД из сравнения оптической и микроволновой мощности ДМЗИ, состоящего из двух боковых полос 1-го, 3-го и более порядков оптического сигнала, что требует строгих уровней микроволнового возбуждения для подавления нежелательной оптической несущей и формирования боковых полос с равными амплитудами. Применяемый метод очень чувствителен к дрейфу смещения АММЦ, что требует активного управления смещением для получения стабилизации, при этом в данном случае только для одного модулятора.

Таким образом, методы, способные обеспечить узкую ширину линии лазера и широкую полосу пропускания оптического ДМЗИ и в то же время позволяющие стабилизировать изменение его мощности, представляют особый интерес. В этой работе предложен гораздо более простой, но улучшенный метод формирования ДМЗИ позволяющий в 3 раза увеличить диапазон измерений.

ДМЗИ, представляющее собой гармонические боковые полосы в оптическом спектре и их суммарные и разностные частотные продукты в электрическом спектре после фотодетектирования, позволяет напрямую извлекать АЧХ ШФД одновременно в нескольких точках, что сокращает время анализа. Предложенный метод сохраняет очень узкую ширину линии ЛД из-за присущей когерентности многочастотных модулированных по интенсивности боковых полос, исходящих из одного и того же лазерного источника. Он не нуждается в какой-либо калибровке в силу невозможности получения неравных по интенсивности или амплитуде составляющих. Более того, характеристики предложенного метода измерения не зависят от напряжения смещения АММЦ, поскольку оно производится по относительным амплитудам, а не по абсолютной амплитуде полученных электрических откликов. При измерении АММЦ управляется микроволновой мощностью 10 дБм, а отношение сигнал для всех составляющих ДМЗИ сохраняется больше 30 дБ во всем диапазоне частот, включая диапазон высоких частот, т.е. напряжение смещения будет иметь такое же влияние на абсолютные амплитуды электрических сигналов, а их относительная амплитуда свободна от изменения смещения или дрейфа.

Главная особенность, не учтенная в данной работе, заключается в том, что при работе в области НЧ АЧХ ШФД в спектре отклика фотоприемника существуют как разностные, так и суммарные частоты. Поэтому перспективно применение РФИ, для которого важным является знание всех частот, определяемых частотой сканирования f_s , и установленная амплитуда на реперной частоте f_{SR} , лежащая на АЧХ наклонного фильтра ОФЛНХ, также известна. В случае

работы с РФИ во второй части общей статьи показано: при известности частоты сканирования с погрешностью 10^{-3} и 10^{-4} относительная погрешность определения амплитуд составит 0,01 и 0,001 % от полного диапазона измерений. Исключение составляет лишь небольшой участок АЧХ ШФД при малом отношении сигнал/шум измерения в области низких не микроволновых частот, меньше 1-10 МГц.

Список литературы

1. Zhang B., Zhu N., Han W. et al. Development of Swept Frequency Method for Measuring Frequency Response of PDs Based on Harmonic Analysis // IEEE Photonics Technol. Lett. – 2009. – Vol. 21. – Pp. 459-461.
2. Sun J.Zh., Xu B.R., Shi D.F. et al. Dual-Wavelength Light Source Assisted Frequency Response Measurement Method of Photodetectors // IEEE Photonics Technology Letters. – 2021. – Vol. 33(14). – Pp. 695-698.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Кузнецов А.А. Методы и средства радиофотонного векторного анализа на основе сверхузкополосного пакета дискретных частот как нового типа зондирующего излучения: диссертация доктора технических наук / А.А. Кузнецов. – Казань, 2021. – 304 с.
7. Morozov O., Nureev I., Sakhabutdinov A. et al. Ultrahigh-resolution Optical Vector Analyzers // Photonics. – 2020. – Vol. 7. – P. 14.
8. Цифровой двойник датчика Фабри-Перо для контроля концентрации парниковых газов // А. Ж. Сахабутдинов, В. И. Анфиногентов, О. Г. Морозов [и др.] // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2022. – Т. 2, № 1. – С. 54-66. – EDN STAAUU.

**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 III. MICROWAVE PHOTONIC ANALYZER OF SPECTRAL
CHARACTERISTICS FOR WIDEBAND PHOTODETECTORS BASED ON
DUAL-BAND MULTI-FREQUENCY PROBING RADIATION OBTAINED BY
FREQUENCY MULTIPLICATION**

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

Annotation. 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. Using the example of symmetrical DDPR synthesized on the basis of scanning frequency multiplication and principles of microwave photonic interrogation, this third part of the work shows the principles of constructing a broadband MPSCA with a six-fold increase in the frequency response measurement range.

Keywords: broadband photodetector, microwave photonic spectral characteristics analyzer; frequency multiplication; wideband discrete frequency package; microwave photonics; microwave photonic interrogator.

Статья представлена в редакцию 01.03.2025