

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ / METHODS AND DEVICES FOR CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND THE NATURAL ENVIRONMENT

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.5>

АНАЛИЗАТОР АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНЫХ ФОТОДЕТЕКТОРОВ НА БАЗЕ ОДНОГО МОДУЛЯТОРА МАХА-ЦЕНДЕРА

Научная статья

Соколов В.С.^{1,*}, Мальцев А.В.², Морозов О.Г.³, Морозов Г.А.⁴, Мисбахов Р.Ш.⁵, Мисбахов Р.Ш.⁶

¹ ORCID : 0000-0001-9438-1323;

³ ORCID : 0000-0003-4779-4656;

⁴ ORCID : 0000-0002-9420-0710;

⁵ ORCID : 0000-0003-0742-7827;

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, Казань, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (vssokolov[at]kai.ru)

Аннотация

Основной характеристикой, определяющей эффективность применения фотодетекторов в высокоскоростных оптоволоконных и радиопотонных линиях связи, является их широкополосная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Статья посвящена анализу методов и средств для измерения АЧХ широкополосных фотодетекторов (ШФД) с высоким разрешением и возможностью ее получения в полном диапазоне при малом диапазоне изменения сканирующей частоты. Как правило, такие анализаторы содержат как минимум специальный лазерный диод и два модулирующих устройства, характеристики которых оказывают существенное влияние на точность измерения, а обеспечение требуемых ими режимов работы – на сложность структуры измерителя. Целью работы является построение нового метода и анализатора с минимизацией структуры и простым управлением. В отличие от существующих в качестве базового блока разработанного анализатора используется только один калиброванный амплитудный модулятор Маха-Цендера (АММЦ), включаемый перед ШФД. При этом модулятор работает в «нулевой» рабочей точке с подавлением несущей, реализуя амплитудно-фазовую модуляцию для преобразования одночастотного когерентного излучения в четырехчастотное на равных по амплитуде первой и третьей боковых составляющих одного модулирующего радиочастотного излучения с частотой f_{RF} , сканирующего для получения полной АЧХ ШФД. По результатам фотосмешения четырех частотных компонент с помощью электронного векторного анализатора определяется АЧХ ШФД по трем частотным составляющим $2f_{RF}$, $4f_{RF}$ и $6f_{RF}$ при каждом значении сканирующей частоты. В результате разработан метод и анализатор для его реализации с минимизированной структурой, состоящей из одного АММЦ, управляемый одним радиочастотным сигналом, при чем диапазон его сканирования может быть до шести раз меньше полосы пропускания тестируемого ШФД.

Ключевые слова: широкополосный фотодетектор, амплитудно-частотная характеристика, анализатор, амплитудный модулятор Маха-Цендера, четырехчастотное зондирующее излучение, минимизация структуры.

AN ANALYSER OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF WIDEBAND PHOTODETECTORS BASED ON A SINGLE MACH-ZEHNDER MODULATOR

Research article

Sokolov V.S.^{1,*}, Maltsev A.V.², Morozov O.G.³, Morozov G.A.⁴, Misbakhov R.S.⁵, Misbakhov R.S.⁶

¹ ORCID : 0000-0001-9438-1323;

³ ORCID : 0000-0003-4779-4656;

⁴ ORCID : 0000-0002-9420-0710;

⁵ ORCID : 0000-0003-0742-7827;

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation

* Corresponding author (vssokolov[at]kai.ru)

Abstract

The main characteristic determining the efficiency of photodetectors application in high-speed fibre optic and radiophoton communication lines is their broadband amplitude-frequency response (AFR). The article is dedicated to the analysis of methods and means for measuring the AFR of wideband photodetectors (WBPD) with high resolution and the possibility of its obtaining in the full range at a small range of scanning frequency variation. As a rule, such analysers contain at least a special laser diode and two modulating devices, the characteristics of which have a significant influence on the measurement accuracy, and providing the required operating modes – on the complexity of the meter structure. The aim of the work is to construct a new method and analyser with structure minimization and simple control. Unlike the existing ones, the developed analyser uses only one calibrated amplitude Mach-Zehnder modulator (AMMZ) as a basic unit, which is switched on before the WBPD. In this case, the modulator operates in the "zero" operating point with carrier suppression, implementing amplitude-phase modulation to convert single-frequency coherent radiation into four-frequency radiation on equal in amplitude first and third side components of a single modulating radio-frequency radiation with frequency f_{RF} , scanning to obtain the full AFR of the WBPD. According to the results of photo-mixing of four frequency components by means of an electronic vector

analyser, the AFR of the WBPД is determined by three frequency components $2f_{RF}$, $4f_{RF}$ and $6f_{RF}$ at each value of the scanning frequency. As a result, a method and an analyser for its implementation with a minimized structure consisting of one AMMZ controlled by one radio frequency signal have been developed, and its scanning range can be up to six times smaller than the bandwidth of the tested WBPД.

Keywords: broadband photodetector, amplitude-frequency response, analyser, Mach-Zehnder amplitude modulator, four-frequency sensing radiation, structure minimization.

Введение

Широкополосные фотодетекторы (ШФД) являются важными элементами оптических приемников в системах оптоволоконной и радиофотонной связи [1]. Контроль частотных характеристик ШФД с высоким разрешением и высокой точностью очень важен для оценки не только характеристик самого устройства, но и характеристик указанных систем в целом [2]. Известны многочисленные методы контроля частотных характеристик ШФД с использованием зондирующих излучений, сформированных полностью оптическими или электрооптическими методами [3].

Полностью оптические методы позволяют проводить измерения спектральных характеристик ШФД на основе гетеродинных и шумовых зондирующих излучений. Однако гетеродинные оптические методы биений требуют контроля самого зондирующего излучения по дрейфу длины волны и флуктуациям мощности с чрезвычайно высокой точностью [4]. Метод оптических биений с шумовым сигналом характеризуется низким отношением сигнал/шум и недостаточным разрешением по частоте [5].

Напротив, электрооптические методы эффективно используют модуляционные подходы для улучшения разрешения по частоте. При этом широко используемый метод электрооптической качающейся частоты [6] сам нуждается в проведении периодической калибровки, чтобы исключить влияние нелинейностей формирующего модулятора. Метод качающейся частоты получил широкое распространение благодаря простоте системы и удобству работы. Однако диапазон частот измерения методом качающейся частоты ограничен частотным диапазоном микроволнового источника, а результат измерения, как уже говорилось, содержит в себе отклик частотной характеристики модулятора.

Метод многочастотного анализа [7], метод двухтональной модуляции интенсивности [8] и метод модуляции с подавлением несущей [9] удваивают частотный диапазон измерений, уменьшая при этом влияние АЧХ модулятора на результаты измерений. Как недостаток последнего метода в [10] приводится аргумент об ограниченности метода по диапазону измерения, хотя это утверждение условно и зависит от решаемых на практике задач, или необходимость использования двух лазеров, биения между которыми всегда представляют проблему.

Основываясь на данном аргументе, в [11], [12] предложено заменить первый каскад модулятора на специальный лазер. В [11] предложен метод модуляции с подавлением несущей, использующий лазер с прямой модуляцией (DML) на фиксированной частоте в качестве источника света. Для работы используется оптический перестраиваемый фильтр (OTF), выделяющий одну боковую полосы первого порядка модулированного источника света и создания излучения с двумя длинами волн, состоящего из несущей и другой боковой полосы первого порядка. Модулятор, следующий за фильтром и настроенный на «нулевую» рабочую точку, используется для формирования двух пар боковых полос первого порядка, генерируемых в диапазоне измерений, которые смешиваются друг с другом и генерируют различные частотные компоненты в электрической области ФД. Частотная характеристика ФД может быть получена непосредственно из отношения мощностей конкретных частотных составляющих. Таким образом, прямой метод модуляции лазера для генерации двухчастотного излучения позволяет избежать проблемы нестабильности частотного интервала, вызванной работой двух лазеров при разных внешних возмущениях, но достаточно сложен в стабильности реализации [3]. Недавно был представлен метод низкоскоростной фотонной выборки для измерения АЧХ в сверхшироком диапазоне частот на основе лазерного диода с синхронизацией мод (MLLD), который также свободен от влияния неравномерности частотных характеристик других элементов в установке [12]. Тем не менее основная трудность этого метода заключается в том, что невозможно получить сверхточное измерение в любой частотной точке, поскольку разрешение по частоте ограничено десятками МГц частоты повторения MLLD.

В [3] также отмечается, что электрооптический метод модуляции с подавлением несущей требует активного управления смещением двух модуляторов интенсивности [13]. Для измерения без калибровки и дрейфа смещения была предложена гетеродинная схема со сдвигом частоты на акустооптическом модуляторе для измерения АЧХ ШФД [10].

Таким образом, применение специальных лазерных источников и методов устранения дрейфа и смещения рабочей точки не дают возможности решения задачи построения АЧХ ШФД по упрощенной схеме: одночастотный лазер плюс модулятор. Поэтому нами были изучены различные аспекты формирования двухполосных двухчастотных зондирующих излучений с подавленной несущей для создания анализатора АЧХ ШФД с минимизированной структурой.

В работе предлагается использовать, опробованную нами в [14] схему для контроля спектральных характеристик амплитудных модуляторов Маха-Цендера (АММЦ) с рядом модификаций: исключен первый модулятор; тонкий выбор параметров модуляции для второго классического АММЦ позволяет выполнить на его базе формирователь четырехчастотного зондирующего излучения (ЧЧЗИ) с подавленной несущей и равными по амплитуде составляющими на первой и третьей боковых полосах модулирующего радиочастотного сигнала; этот же радиочастотный сигнал позволяет просканировать АЧХ ШФД в полной полосе пропускания, при этом диапазон сканирования будет значительно меньше и позволит использовать относительно узкополосный генератор радиочастот.

Таким образом, целью работы является создание анализатора АЧХ ШФД с минимизацией его структуры до одного АММЦ, а также использованием одного управляющего радиочастотного сигнала как для формирования ЧЧЗИ, так и сканирования полосы пропускания ШФД.

Для достижения цели в первом разделе статьи рассмотрена предлагаемая структура анализатора и принципы его работы для формирования ЧЧЗИ для анализа АЧХ ШФД. Во втором разделе представлены математические модели получения радиочастотной информации с ШФД для построения его АЧХ. В третьем разделе обсуждены результаты экспериментальных исследований и вопросы обеспечения точности и стабильности измерений. В заключении подведены итоги работы и определены направления дальнейших исследований.

Структурная схема анализатора АЧХ ШФД

На рис. 1 представлена структурная схема анализатора для демонстрации метода построения АЧХ тестируемого ШФД. На рис. 2 представлены спектрограммы формирования ЧЧЗИ и информационного сигнала радиодиапазона для построения АЧХ тестируемого ШФД.

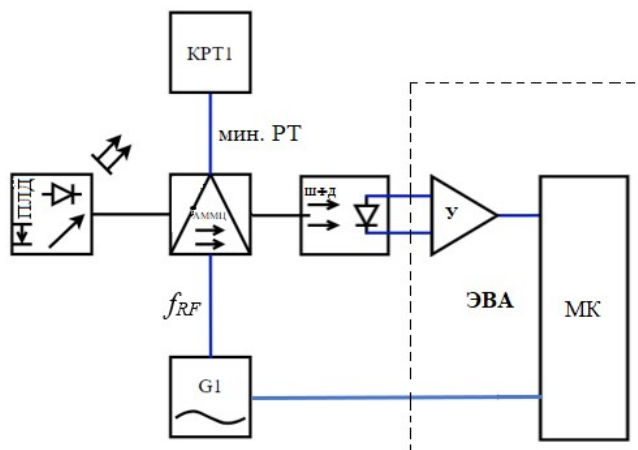


Рисунок 1 - Структурная схема анализатора
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.5.1>

Примечание: КРТ – контроллер рабочей точки; У – усилитель; МК – микроконтроллер; ЭВА – электронный векторный анализатор

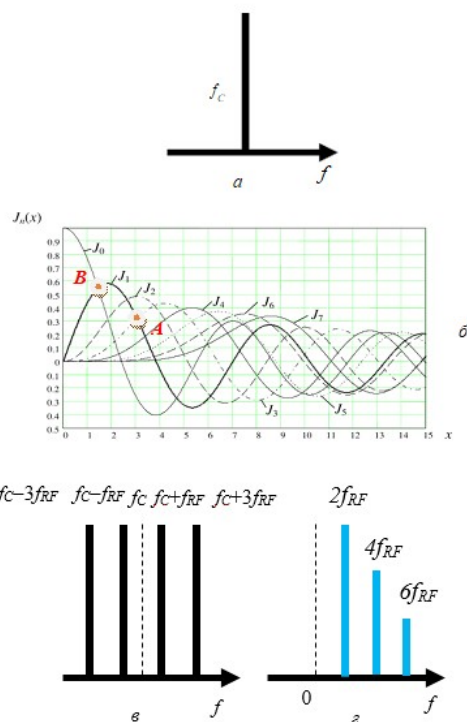


Рисунок 2 - Спектрограммы (а, в) и условия (б) формирования ЧЧЗИ для мониторинга ШФД, спектрограмма информационных сигналов радиодиапазона для построения его АЧХ (г)
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.5.2>

Непрерывное лазерное излучение (рис. 2, а) с амплитудой E_C и несущей частотой f_c поступает с перестраиваемого лазерного диода (ПЛД) с распределенной обратной связью на модулятор формирования ЧЧЗИ с подавленной несущей, работающий в «нулевой» точке модуляционной характеристики и управляемый радиочастотным сигналом на частоте f_{RF} (генератор G1). Как известно, функция Бесселя является определяющей при формировании модуляционных характеристик АММЦ. Для формирования ЧЧЗИ используется особенность функции Бесселя первого рода, имеющая равные значения для функций первого и третьего порядка (точка А, рис. 2, б) при одинаковом аргументе, равном 3,102. На выходе АММЦ формируется ЧЧЗИ, состоящее из нижней и верхней боковых полос на частотах $f_c + f_{RF}$ и $f_c + 3f_{RF}$. Несущая частота f_c подавлена до уровня 30 дБ в силу конструктивных особенностей модулятора (рис. 2, в).

Полученное ЧЧЗИ поступает далее на ШФД. Обе боковые полосы после фотосмешения позволяют получить информацию о спектральной характеристике исследуемого ШФП в трех точках $2f_{RF}$, $4f_{RF}$ и $6f_{RF}$ для одного измерения с помощью электронного векторного анализатора (ЭВА) (рис. 2, г). Мощность указанных составляющих является откликом тестируемого ШФД. Следовательно, сканируя частоту зондирования f_{RF} с помощью генератора G1 можно получить полную АЧХ тестируемого ШФД. При этом диапазон сканирования составит от 0 до f_{RF} , а диапазон измерений от 0 до $6f_{RF}$, где $6f_{RF}$, в принципе, должно быть соизмеримо с шириной полосы пропускания ШФД.

Математическое моделирование процедур построения АЧХ ШФД

Анализ отдельных поставленных задач, позволил предположить возможность их решения на основе определения эффективности преобразования зондирующего излучения в ШФД из отношения между оптической мощностью ЧЧЗИ и электрической мощностью одночастотных сигналов биений между его компонентами.

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

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

где m коэффициент амплитудно-фазовой модуляции калиброванного модулятора.
 При $m = 3,102$ получим

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

Ток на выходе фотодетектора можно описать с помощью разложения Якоби-Ангера с выделением искомым составляющих на частоте $n f_{RF}$

$$I \propto \Re(f) E_{\text{out}} E_{\text{out}}^* =$$

$$= E_C^2 \left\{ \begin{array}{l} 6\Re(2f_{RF}) J_1(m) \cos(4\pi f_{RF} t) + \\ + 4\Re(4f_{RF}) J_1(m) \cos(8\pi f_{RF} t) + \\ + 2\Re(6f_{RF}) J_1(m) \cos(12\pi f_{RF} t) \end{array} \right\}, \quad (3)$$

где $\Re(f)$ – спектральный отклик ШФД на частоте f .

Относительный частотный отклик тестируемого ШФД может быть вычислен по отношению каждого слагаемого (3) к значению отклика на максимальной частоте сканирования $f_S = 5$ ГГц, назовем ее 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 $m = 1,53$ (точка В, рис. 2, б).

Учитывая (3) получим:

$$P(2f_S) : \frac{1}{2} \Re^2(2f_S) R_{\text{ШФД}}, \quad (4)$$

$$\Re(2f_{RF}) : \sqrt{\frac{P(2f_{RF})}{3P(2f_S)}}, \quad (5)$$

$$\Re(4f_{RF}) : \sqrt{\frac{P(4f_{RF})}{2P(2f_S)}}, \quad (6)$$

$$\Re(6f_{RF}) : \sqrt{\frac{P(6f_{RF})}{P(2f_S)}}, \quad (7)$$

где $R_{\text{ШФД}}$ – нагрузка тестируемого фотоприемника, (4) – мощность тестируемого фотоприемника на частоте $2f_S$, (5) – отклик тестируемого фотоприемника на частотах $2f_{RF}$, (6) – отклик тестируемого фотоприемника на частотах $4f_{RF}$, (7) – отклик тестируемого фотоприемника на частотах $6f_{RF}$.

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

Результаты экспериментальных исследований

Для проверки работоспособности предлагаемого анализатора АЧХ ШФД был проведен макетный эксперимент в диапазоне до 0-30 ГГц при диапазоне сканирования 0-5 ГГц. В макете использован ПЛД на С+L диапазон (Quantifi Photonics), настроенный на длину волны 1550,108 нм для генерации непрерывного излучения мощностью 10 дБм. Для достижения ЧЧЗИ с подавленной несущей в качестве калиброванного АММЦ использован коммерческий амплитудный модулятор с полосой до 10 ГГц (MXAN-LN-10), напряжение смещения постоянного напряжения которого в «нулевой» рабочей точке точно регулировалось с помощью контроллера рабочей точки КРТ1 (рис. 1). Калиброванный ЭВА цепей FSH8 (R&S) использовался для генерации одночастотного микроволнового сигнала с частотным сканированием, подаваемого на АММЦ, обеспечения коэффициента модуляции $m = 3,102$ и измерения мощности восстановленных из ЧЧЗИ сигналов биений на разностных частотах $2f_{RF}$, $4f_{RF}$ и $6f_{RF}$.

В качестве тестируемого использовался ШФД P30A (Apic). Обоснованный выбор значения разностной частоты шага частоты f_S сводился к определению по рис. 3 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) [15]. При использовании сверхузкополосного лазера (доли кГц) она может быть определена частотами 0,5-5 кГц.

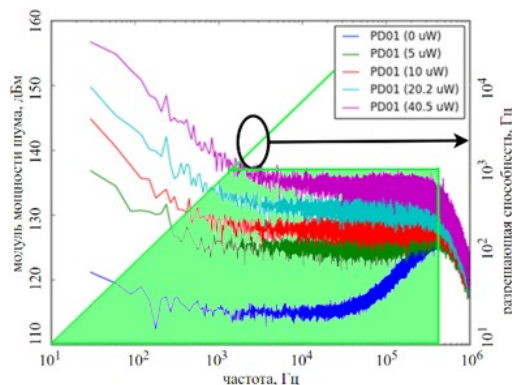


Рисунок 3 - К выбору шага сканирования для измерения АЧХ
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.5.3>

На рис. 4 представлена измеренная относительная АЧХ тестируемого ШФД, на которой красные кружки обозначают результаты измерений, полученные с использованием предложенного метода, а сплошная линия с помощью метода векторного анализатора [3]. Реперная частота составляла 5 ГГц.

Сканирование осуществлялось в диапазоне от 0,1 до 5 ГГц с шагом и разрешением в 50 МГц. Ширину полосы тестируемого ШФД определяли до частот чуть более 20 ГГц. Точки измерения (кружки) показаны с шагом 500 МГц. Для регистрации частот свыше 5 ГГц использовался разработанный на кафедре РФМТ измеритель мгновенных частот, основанный на анализе множества неизвестных частот по неплоской гребенке, сформированной в фазовом электрооптическом модуляторе [3].

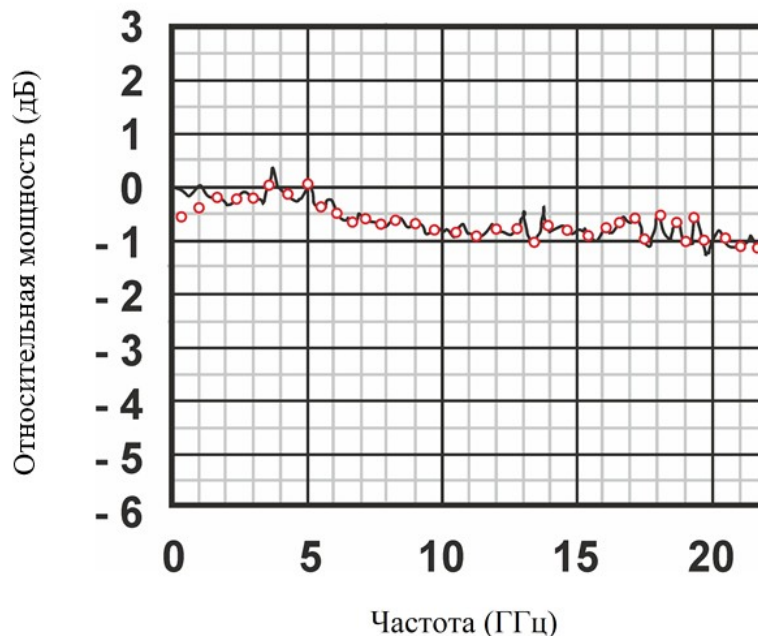


Рисунок 4 - Относительная АЧХ тестируемого ШФД

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.5.4>

Результаты, представленные на рис. 4, показывают, что предложенный метод применим для определения АЧХ ШФД с высоким разрешением, которое определяется характеристиками либо ЭВА, либо шириной линии излучения лазера.

Заключение

В работе был предложен метод и экспериментально продемонстрирован реализующий его анализатор АЧХ ШФД с минимизацией структуры и управлением с помощью одного радиочастотного сигнала.

При анализе АЧХ ШФД достигнуто учетверение диапазона измерения, основанное на формировании ЧЧЗИ на особенностях модуляционной характеристики АММЦ. АЧХ ШФД в частотном диапазоне 20 ГГц, были получены с помощью компонент сканирования с частотой 5 ГГц. При дальнейших исследованиях при тех же параметрах сканирования может быть достигнут диапазон измерений в 30 ГГц, что будет свидетельствовать об ушестерении диапазона измерений по сравнению с диапазоном сканирования.

Можно предположить, что проведенные измерения нечувствительны к смещению рабочей точки ММЦ, потому что они основаны на относительной амплитуде, а не на абсолютной амплитуде ЧЧЗИ. По сравнению с обычным гетеродинным методом, метод обеспечивает очень узкую ширину линии компонент ЧЧЗИ из-за полностью когерентных оптических боковых полос, и обеспечивает самокалибровку без коррекции изменения мощности ЧЧЗИ.

В отличие от существующих устройств достигнута упрощенная структура анализатора на базе одного универсального лазера и модулятора, что делает анализатор экономически эффективными для практического применения. Кроме того, формирование ЧЧЗИ применимо для различных уровней зондирования и рабочих длин волн. АЧХ на радиочастотах были получены из мощности продуктов биений компонент ЧЧЗИ, соотношенных к значениям мощности реперной частоты.

Новый анализатор АЧХ ШФД с минимизацией структуры и расширением диапазона измерений представляет собой простое, недорогое и надежное решение, которое преодолевает недостатки известных решений. Его 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 [16], [17], [18], радиолокации и радионавигации [19], [20].

Финансирование

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

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The research was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the "Priority-2030" programme.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Capmany J. Microwave Photonics Combines Two Worlds / J. Capmany, D. Novak // *Nature Photonics*. — 2007. — 1. — P. 319-330.
2. Hale P.D. Calibrated Measurement of Optoelectronic Frequency Response / P.D. Hale, D.F. Williams // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* — 2003. — 51. — P. 1422-1429.
3. Morozov O. Ultrahigh-resolution Optical Vector Analyzers / O. Morozov, I. Nureev, A. Sakhabutdinov [et al.] // *Photonics*. — 2020. — 7. — P. 14.
4. Hale P.D. A transfer Standard for Measuring Photoreceiver Frequency Response / P.D. Hale, C.M. Wang, R. Park [et al.] // *J. Lightw. Technol.* — 1996. — 14. — P. 2457-2466.
5. Robinson S.P. The Measurement of the Frequency Response of a Photodiode and Amplifier Using an Optomechanical Frequency Response Calibrator / S.P. Robinson, D.R. Bacon, B.C. Moss // *Meas. Sci. Technol.* — 1990. — 1. — P. 1184-1187.
6. Li S.P. Ultrafast and Ultrahigh-resolution Optical Vector Analysis Using Linearly Frequency-Modulated Waveform and Dechirp Processing / S.P. Li, M. Xue, T. Qing [et al.] // *Opt. Lett.* — 2019. — 44. — P. 3322-3325.
7. Gifford D.K. Optical Vector Network Analyzer for Single-scan Measurements of Loss, Group Delay, and Polarization Mode Dispersion / D.K. Gifford, B.J. Soller, M.S. Wolfe [et al.] // *Appl. Opt.* — 2005. — 44. — P. 7282-7286.
8. Guo B. Characterization of Passive Optical Components with Ultra-fast Speed and High-resolution Based on DD-OFDM / B. Guo, T. Gui, Z. Li [et al.] // *Opt. Express*. — 2012. — 20. — P. 22079-22086.
9. Pan S. Ultrahigh-resolution Optical Vector Analysis Based on Optical Single-sideband Modulation / S. Pan, M. Xue // *J. Lightw. Technol.* — 2017. — 35. — P. 836-845.
10. Qing T. Comprehensive Vector Analysis for Electro-optical, Opto-electronic and Optical Devices / T. Qing, Sh. Li, X. Tang [et al.] // *Opt Lett.* — 2021. — 46(8). — P. 1856-1859.
11. Sun J.Zh. Dual-wavelength Light Source Assisted Frequency Response Measurement Method of Photodetectors / J.Zh. Sun, B.R. Xu, D.F. Shi [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 2021. — 33(14). — P. 695-698.
12. Ma Y. Self-calibrating Microwave Characterization of Broadband Mach-Zehnder Electro-optic Modulator Employing Low-speed Photonic Down-conversion Sampling and Low-frequency Detection / Y. Ma, Zh. Zhang, Sh. Zhang [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. — 2019. — 37(11). — P. 2668-2674.
13. Yoshioka M. A Method for Measuring the Frequency Response of Photodetector Modules Using Twice-modulated Light / M. Yoshioka, S. Sato, T. Kikuchi // *Journal of Lightwave Technology*. — 2005. — 23(6). — P. 2112-2117.
14. Morozov O.G. Two-frequency DSB-SC Modulation for Relative Frequency Response Measurement of Mach-Zehnder Amplitude Modulators / O.G. Morozov, A.Zh. Sakhabutdinov, V.S. Sokolov [et al.] // *Proc. of IEEE Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. — 2023. — P. 1-4.
15. Кузнецов А.А. Сравнительная оценка способов формирования излучений в виде сверхузкополосного пакета дискретных частот / А.А. Кузнецов // *Инженерный вестник Дона*. — 2021. — 9. — С. 8.
16. Морозов О.Г. 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.
17. Иванов А.А. Радиотонный 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.
18. Ivanov A. Photonic-assisted Receivers for Instantaneous Microwave Frequency Measurement Based on Discriminators of Resonance Type / A. Ivanov, O. Morozov, A. Sakhabutdinov [et al.] // *Photonics*. — 2022. — 9. — P. 754.
19. Морозов О.Г. Радиотонный 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.
20. Морозов О.Г. Радиотонный метод определения угла прихода отраженного 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.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Capmany J. Microwave Photonics Combines Two Worlds / J. Capmany, D. Novak // Nature Photonics. — 2007. — 1. — P. 319-330.
2. Hale P.D. Calibrated Measurement of Optoelectronic Frequency Response / P.D. Hale, D.F. Williams // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. — 2003. — 51. — P. 1422-1429.
3. Morozov O. Ultrahigh-resolution Optical Vector Analyzers / O. Morozov, I. Nureev, A. Sakhabutdinov [et al.] // Photonics. — 2020. — 7. — P. 14.
4. Hale P.D. A transfer Standard for Measuring Photoreceiver Frequency Response / P.D. Hale, C.M. Wang, R. Park [et al.] // J. Lightw. Technol. — 1996. — 14. — P. 2457-2466.
5. Robinson S.P. The Measurement of the Frequency Response of a Photodiode and Amplifier Using an Optomechanical Frequency Response Calibrator / S.P. Robinson, D.R. Bacon, B.C. Moss // Meas. Sci. Technol. — 1990. — 1. — P. 1184-1187.
6. Li S.P. Ultrafast and Ultrahigh-resolution Optical Vector Analysis Using Linearly Frequency-Modulated Waveform and Dechirp Processing / S.P. Li, M. Xue, T. Qing [et al.] // Opt. Lett. — 2019. — 44. — P. 3322-3325.
7. Gifford D.K. Optical Vector Network Analyzer for Single-scan Measurements of Loss, Group Delay, and Polarization Mode Dispersion / D.K. Gifford, B.J. Soller, M.S. Wolfe [et al.] // Appl. Opt. — 2005. — 44. — P. 7282-7286.
8. Guo B. Characterization of Passive Optical Components with Ultra-fast Speed and High-resolution Based on DD-OFDM / B. Guo, T. Gui, Z. Li [et al.] // Opt. Express. — 2012. — 20. — P. 22079-22086.
9. Pan S. Ultrahigh-resolution Optical Vector Analysis Based on Optical Single-sideband Modulation / S. Pan, M. Xue // J. Lightw. Technol. — 2017. — 35. — P. 836-845.
10. Qing T. Comprehensive Vector Analysis for Electro-optical, Opto-electronic and Optical Devices / T. Qing, Sh. Li, X. Tang [et al.] // Opt Lett. — 2021. — 46(8). — P. 1856-1859.
11. Sun J.Zh. Dual-wavelength Light Source Assisted Frequency Response Measurement Method of Photodetectors / J.Zh. Sun, B.R. Xu, D.F. Shi [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. — 2021. — 33(14). — P. 695-698.
12. Ma Y. Self-calibrating Microwave Characterization of Broadband Mach-Zehnder Electro-optic Modulator Employing Low-speed Photonic Down-conversion Sampling and Low-frequency Detection / Y. Ma, Zh. Zhang, Sh. Zhang [et al.] // Journal of Lightwave Technology. — 2019. — 37(11). — P. 2668-2674.
13. Yoshioka M. A Method for Measuring the Frequency Response of Photodetector Modules Using Twice-modulated Light / M. Yoshioka, S. Sato, T. Kikuchi // Journal of Lightwave Technology. — 2005. — 23(6). — P. 2112-2117.
14. Morozov O.G. Two-frequency DSB-SC Modulation for Relative Frequency Response Measurement of Mach-Zehnder Amplitude Modulators / O.G. Morozov, A.Zh. Sakhabutdinov, V.S. Sokolov [et al.] // Proc. of IEEE Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. — 2023. — P. 1-4.
15. Kuznecov A.A. Sravnitel'naja ocenka sposobov formirovaniya izluchenij v vide sverhuzkopolosnogo paketa diskretnyh chastot [A Comparative Evaluation of the Methods of Formation of Radiations in the Form of Ultra Narrowband Discrete Frequency Packet] / A.A. Kuznecov // Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. — 2021. — 9. — P. 8. [in Russian]
16. Morozov O.G. Izmerenie mgnovnoj chastoty mikrovolnovyh signalov s ispol'zovaniem tandemnoj amplitudno-fazovoj moduljacji v opticheskom diapazone [Measurement of Instantaneous Frequency of Microwave Signals Using Tandem Amplitude-Phase Modulation in the Optical Range] / O.G. Morozov, I.I. Nureev, A.Zh. Sahabutdinov [et al.] // Foton-jekspress [Foton Express]. — 2019. — 5(157). — P. 16-24. [in Russian]
17. Ivanov A.A. Radifotonnyj metod izmerenija mgnovnyh chastot mnozhestva radiosignalov na osnove additivnogo chastotnogo smeshhenija s rasshirenym diapazonom izmerjaemyh chastot [Radiophotonic Method for Measuring Instantaneous Frequencies of Multiple Radio Signals Based on Additive Frequency Shift with Extended Measured Frequency Range] / A.A. Ivanov, O.G. Morozov, A.Zh. Sahabutdinov [et al.] // Foton-jekspress [Foton Express]. — 2019. — 6(158). — P. 85-86. [in Russian]
18. Ivanov A. Photonic-assisted Receivers for Instantaneous Microwave Frequency Measurement Based on Discriminators of Resonance Type / A. Ivanov, O. Morozov, A. Sakhabutdinov [et al.] // Photonics. — 2022. — 9. — P. 754.
19. Morozov O.G. Radiofotonnyj metod opredelenija doplerovskogo izmenenija chastoty otrazhjonogo radiolokacionnogo signala na osnove tandemnoj amplitudno-fazovoj moduljacji [Radio-photonic Method for Determination of Doppler Frequency Variation of Reflected Radar Signal on the Basis of Tandem Amplitude-Phase Modulation] / O.G. Morozov, G.A. Morozov, G.I. Il'in [et al.] // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Radiotekhnicheskie i infokommunikacionnye sistemy [Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. — 2021. — 2(50). — P. 63-75. [in Russian]
20. Morozov O.G. Radiofotonnyj metod opredelenija ugla prihoda otrazhennogo radiolokacionnogo signala na osnove tandemnoj amplitudno-fazovoj moduljacji [Radio-photonic Method for Determination of the Angle of Arrival of the Reflected Radar Signal on the Basis of Tandem Amplitude-Phase Modulation] / O.G. Morozov, G.A. Morozov, G.I. Il'in [et al.] // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Radiotekhnicheskie i infokommunikacionnye sistemy [Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. — 2021. — 1(49). — P. 50-62. [in Russian]