

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ МГНОВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТ МНОЖЕСТВА МИКРОВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ, ПОСТРОЕННЫХ НА ОСНОВЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПАКЕТОВ ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТОТ

Л.Д. Ибрагимов, А.А. Иванов, И.И. Нуреев, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов

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

Аннотация. В данном обзоре рассматриваются современные радиофотонные методы мгновенного измерения частот микроволновых сигналов, освещаются их явные преимущества и проблемы при обнаружении многочастотных и широкополосных вариантов. Подробно обсуждаются различные методы оптической обработки для мгновенного измерения частот, включая методы отображения частота-пространство (канализация), в том числе в сочетании с методами отображения частота-мощность. Отдельно рассматриваются методы формирования и применения широкополосных пакетов дискретных частот как основы реализации методов канализации и измерения частот, а также процедур переноса измеряемых микроволновых сигналов в оптический диапазон с использованием специальных методов модуляции. Эти современные достижения в совокупности расширяют диапазоны и повышают точность измерения частот микроволновых сигналов, предлагая надежные и масштабируемые решения для различных применений, включающих радиолокационные, телекоммуникационные и др.

Ключевые слова: мгновенное измерение частот, микроволновый сигнал, широкополосные пакеты дискретных частот, отображение частота-пространство, отображение частота-мощность, радиофотонные системы

Введение

За прошедшие годы методы мгновенного измерения частоты (МИЧ) микроволновых сигналов (МС) претерпели значительные изменения, оставив в прошлом электронные подходы, ограниченные по полосе пропускания и точности, и развиваются в настоящее время на более эффективных радиофотонных, лишенных указанных недостатков [1-5]. Радиофотонные системы МИЧ представляют собой инновационный подход, использующий различные фотонные эффекты и устройства для достижения высокоточных и широкодиапазонных измерений одно- и многочастотных, а также широкополосных МС. Эти системы характеризуются точностью измерений в десятки МГц для диапазона в десятки ГГц, демонстрируя исключительную стабильность и шумовые характеристики. Основным их недостатком является структурная сложность, характеризуемая применением комплексных, или каскадированных электрооптических модуляторов, которые определяют их существенную стоимость. Интеграция сложных радиофотонных схем в компактные фотонные или гибридные с микроэлектронными чипы обещает дальнейшее развитие в данной области, повышая производительность и применимость устройств МИЧ МС [6-8]. Интеграция аппаратных решений с машинным обучением повышает потенциал интеллектуальных систем для МИЧ МС в области адаптации и оптимизации процессов измерения, что приводит к более точным и надежным результатам [9, 10]. Возможны и другие варианты решений по снижению структурной сложности МИЧ МС без потери качества их метрологических измерений, ос-

нованные на применении широкополосных дискретных пакетов частот, ШПДЧ (в англоязычной литературе употребляется термин – *optical frequency comb-generator (OFC)*, в отечественной – *оптическая гребенка*).

В этом обзоре освещаются последние достижения в области МИЧ МС, построенных на основе дискретных пакетов частот, с помощью которых можно измерять частоты множества МС, с акцентом на их структурные особенности, принципы формирования, преимущества и недостатки при решении задач повышения точности и стабильности систем МИЧ. Анализ этих достижений позволяет глубже понять критическую роль указанного типа МИЧ множества МС в телекоммуникационных, радиолокационных и других приложениях двойного назначения, а также в различных научных и инженерных областях, открывая путь для будущих инноваций, что и является целью работы.

Далее работа построена следующим образом. В первом разделе анализируются общие вопросы построения радиофотонных систем измерения частоты микроволновых сигналов. Во втором разделе акцент ставится на применении ШПДЧ в системах МИЧ МС на основе методов с отображением частота-пространство. В третьем разделе рассматривается сочетание указанных методов с методами отображения частота-мощность. Четвертый раздел посвящен особенностям и преимуществам применения комбинированных систем при построении их как симметричных, как в кале формирования ШПДЧ, так и в канале переноса МС на оптическую несущую. В заключении обсуждаются результаты анализа и предлагаются направления исследований для построения рассматриваемых систем более высокого качества.

1. Радиофотонные методы измерения частоты микроволновых сигналов

Радиофотонная система МИЧ МС включает четыре основных блока (рис. 1): источник оптической несущей, устройство переноса МС на оптическую несущую, блок оптической обработки радиофотонного сигнала и преобразователь обработанного радиофотонного сигнала в электрический низкочастотный или радиочастотный с последующей их обработкой.

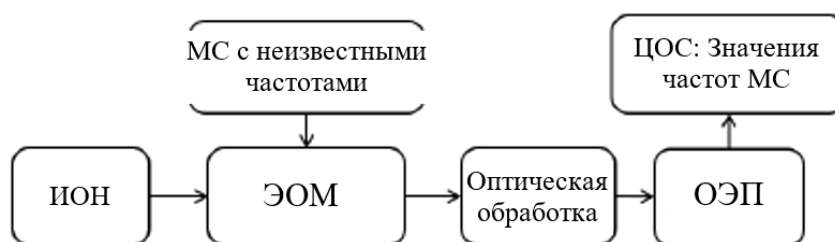


Рис. 1. Функциональная блок-схема радиофотонной системы МИЧ МС

Источниками оптической несущей (ИОН) могут быть одночастотные, узкополосные или широкополосные лазеры, лазерные диоды непрерывного излучения, лазерные источники пакетов дискретных частот – широкополосные (ШПДЧ) [11] или сверхузкополосные (СПДЧ) [12] – непрерывного излучения, а также лазеры с синхронизацией мод импульсного излучения. Перенос МС в оптическую область осуществляется посредством амплитудной, фазовой или поляризационной модуляции, как правило, с помощью электрооптических модуляторов (ЭОМ) соответствующего типа. Оптическая обработка составляет ядро системы МИЧ, где основные операции обработки сигнала происходят в оптической области и могут включать различные операции, такие как фильтрация, фотосмещение, преобразование частоты в более удобные для интерпретации параметры сигнала и др. После оптической обработки следует оптоэлектронное преобразование (ОЭП) и на выходе нелинейных фотоприемников формируются выходные электронные низкочастотные или радиочастотные

сигналы, которые далее форматируются для обнаружения и интерпретации измеренной частоты МС с помощью цифровой обработки сигналов (ЦОС).

Оптические методы обработки частоты одиночного или частот множества МС обычно можно разделить на методы, которые преобразуют частоту в мощность, время, фазу или пространство. Метод отображения частоты в пространство (МОЧП), также известный как канализация, разделяет частотные компоненты МС на пространственно-разграниченные по полосе каналы [13-17] с помощью демультимплексоров. В целом, канализация является полезным методом для точного определения частотной информации внутри определенных каналов, в которых размещены подмножества принимаемого множества частот МС, однако, несмотря на фотонный формат, достаточно громоздка и требует множества фотоприемников по одному-два на канал мультиплексора. Метод отображения частоты во время (МОЧВ) напрямую отображает частоту неизвестных сигналов в определенный набор относительных временных задержек [18,19]. В методе отображения частоты в мощность (МОЧМ) частота МС определяется из ее уникального соответствия выходной амплитуде фильтра со сформированной функцией сравнения амплитуд [20,21]. Кроме того, было продемонстрировано, что метод отображения частоты на фазу или частоты на фазовый наклон (МОЧФ) дополнительно позволяет измерять широкополосные частотные сигналы и устранять недостатки методов МОЧМ, избегая неоднозначности измерения частоты [22-26].

Общепринятым считается, что методы МОЧМ в основном способны обнаруживать одночастотные МС, в то время как методы МОЧП, МОЧВ и гибридные методы, сочетающие МОЧВ и МОЧП с методами МОЧФ, могут обнаруживать множество МС и широкополосные МС.

Методы МОЧВ превосходят традиционные электронные методы по скорости и точности, обеспечивая высокое разрешение измерения и широкий частотный диапазон. Еще один важный аспект заключается в том, что МОЧВ выигрывает по устойчивости, присущей фотонным системам, которые менее подвержены электромагнитным помехам по сравнению с традиционными электронными системами, что способствует эффективной работе в условиях перегруженной электромагнитными излучениями окружающей среды [27]. Эта устойчивость усиливает потенциал интеграции МОЧВ в такие приложения, как радиолокация и телекоммуникации, где измерения частоты имеют решающее значение. Примечательно, что реализация МОЧВ также выигрывает от уменьшения сложности и размера оборудования, что важно для приложений в условиях ограниченного пространства, таких как бортовые системы [28]. Эти характеристики способствуют проектированию компактных радиофотонных систем, которые выполняют задачи измерения с минимальными структурными издержками, сохраняя при этом значительную точность измерений [29].

С другой стороны, методы МОЧП выгодны благодаря своим возможностям работы в реальном времени и эффективности обработки многочастотных сигналов в широком диапазоне. Как отмечается в [30] для упрощения реализации МОЧП используются такие устройства, как сканирующие фильтры Фабри-Перо (ФФП) или специальные волоконные брэгговские решетки, что позволяет уменьшить число мультиплексоров и одновременно контролировать несколько частот. Эта возможность многочастотного измерения значительно расширяет функциональность систем МИЧ, делая МОЧП идеально подходящим для современных приложений, требующих высокой точности измерения сложных по частоте сигналов. Кроме того, способность МОЧП отображать частоты сигнала в пространственные измерения обеспечивает интуитивно понятное представление о характеристиках сигнала, предлагая более широкое понимание ситуации в сценариях мониторинга [30].

В МОЧП для пространственной или полосовой канализации в основном используются равномерные по частоте, но неравномерные по амплитуде ШПДЧ [31]. Однако эта структурная особенность ШПДЧ не до конца оценена разработчиками. Нами в [32] была

показана возможность реализации МОЧП на основе МОЧМ, при этом для частотного разделения использовался ШПДЧ, а компоненты ШПДЧ при равномерном частотном разномсе отличались монотонным неравенством по амплитуде. Данное решение позволяет исключить из схемы демультиплексоры и оставить для регистрации оптических обработанных сигналов один фотоприемник, т.е. использовать амплитудную дискриминацию.

2. ШПДЧ в системах мгновенного измерения частот множества микроволновых сигналов на основе методов с отображением частота-пространство

В [31] продемонстрирована широкополосная реконфигурируемая система МИЧ множества МС с использованием неравномерного по амплитуде ШПДЧ и пространственной канализации (рис. 2). Излучение непрерывного лазера модулируется по интенсивности в амплитудном модуляторе Маха-Цендера (АММЦ) пилообразным сигналом в режиме однополосной модуляции с подавленной несущей, формируя неравномерный по амплитуде ШПДЧ. ШПДЧ разделяется на два канала. В первом он поступает на двухпортовый АММЦ, где модулируется множеством частот МС, и далее на первый волновой мультиплексор (канализатор). Во втором после усиления он поступает на второй волновой демультиплексор.

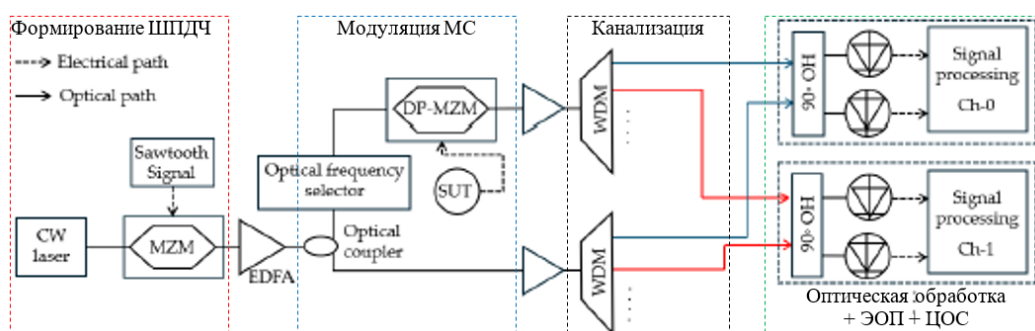


Рис. 2. Схема системы МИЧ на основе неравномерного по амплитуде ШПДЧ, полученного с помощью пилообразной модуляции, и использованием канализации (адаптировано из [31])

Выходы двух демультиплексоров затем объединяются с помощью 90° оптического гибрида и детектируются с помощью пары сбалансированных фотоприемников. Неизвестные частоты МС идентифицируются путем определения номера канала, в котором находится сигнал, и частоты, обнаруженной в этом канале. Эксперименты по моделированию показали возможность проведения измерений в диапазоне 0,01–70 ГГц с погрешностью в пределах $\pm 3,24$ МГц. При этом использовался 35 компонентный ШПДЧ, увеличение количества компонент до 51 позволяет увеличить диапазон измерений до 102 ГГц без изменения погрешности.

В [33] представлена система МИЧ множества МС в диапазоне 100 ГГц с использованием равномерного по амплитуде ШПДЧ и полосовой канализации. При этом в схему введена канальная развязка по демультиплексорам (рис. 3). В отличие от [31] канал ШПДЧ развязан с каналом модуляции множеством неизвестных частот. В нижнем канале исходная оптическая несущая модулируется двумя АММЦ, управляемыми радиочастотными сигналами (f_2 и f_3), для генерации 25-компонентного равномерного по амплитуде ШПДЧ с шагом f_3 . В верхний канал введено устройство сдвига частоты АММЦ и оптический полосовой фильтр, в результате чего происходит сдвиг оптической несущей частоты (f_c) непрерывного лазера на величину радиочастотного сигнала (f_1). Этот сдвинутый по частоте сигнал несущей модулируется множеством неизвестных частот МС в двухпортовом АММЦ, работаю-

щем в режиме однополосной модуляции с подавлением несущей. Частоты нижнего и верхнего каналов развязаны. Однако выполняется условие, что первая компонента ШПДЧ задана таким образом, чтобы совпадать со сдвинутой оптической несущей частотой.

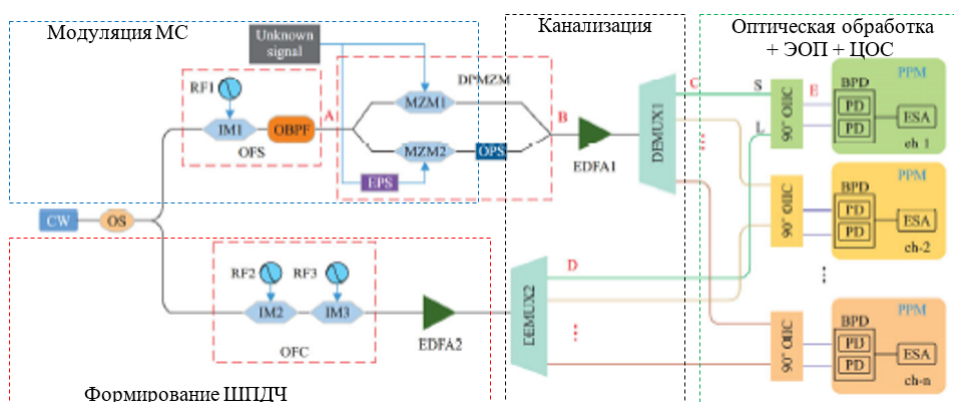


Рис. 3. Схема системы МИЧ на основе равномерного ШПДЧ, полученного на двух каскадных АММЦ, и использованием канализации (адаптировано из [33])

Модулированный сигнал неизвестных частот в верхней части плеча и сигнал 25-ти компонентного ШПДЧ канализируются через два отдельных демультиплексора, а выходы обоих демультиплексоров объединяются с помощью 90° оптических гибридов и детектируются с помощью балансных фотоприемников.

При шаге частот ШПДЧ в 2 ГГц система обеспечивает диапазон измерения частоты 0,01–50 ГГц с погрешностью измерения менее ± 5 МГц. При шаге частот ШПДЧ в 4 ГГц диапазон измерения расширяется до 0,01–100 ГГц с погрешностью измерения частоты 5–14,6 МГц. Это демонстрирует возможность реконфигурации системы, которая решает проблему неоднозначности определения неизвестной частоты с учетом равной амплитуды компонент ШПДЧ и возможности появления зеркального канала.

3. ШПДЧ в системах мгновенного измерения частот множества микроволновых сигналов на основе сочетания методов отображения частота-пространство и частота-мощность

Канализация также может быть объединена с МОЧМ для обеспечения МИЧ множества частот МС с улучшенными характеристиками. В [34] продемонстрирована такая система (рис. 4).

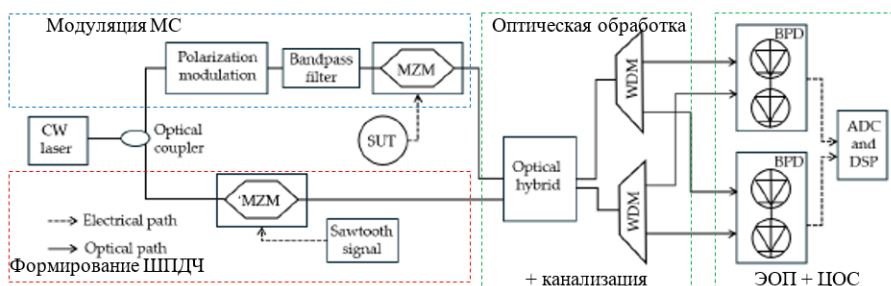


Рис. 4. Схема системы МИЧ множества частот МС, основанная на комбинации МОЧП и МОЧМ с неравномерным по амплитуде ШПДЧ (адаптировано из [34])

МОЧП осуществляется посредством канализации с использованием неравномерного по амплитуде ШПДЧ с регулируемым расстоянием между компонентами, определяемым

параметрами пилообразной волновой модуляции. МОЧМ обеспечивается идентификацией частоты на основе соотношения мощностей биений частот внутри субканалов. Данная методика использует 90° оптический гибрид и балансные фотоприемники для подавления интермодуляционных помех. Результаты моделирования показывают возможность проведения измерений в диапазоне 0–32 ГГц с использованием двух каналов. Разрешение определяется частотой дискретизации электрического спектрального анализатора, например, векторного анализатора цепей (ВАЦ). Шум системы влияет на идентификацию подканалов, что может ограничивать точность обнаружения близко расположенных соотношений мощности. Система устраняет «слепые зоны» путем регулирования интервалов между подканалами и использования низкоскоростных устройств постобработки, что позволяет дополнительно снизить стоимость системы в целом.

Системы с канализацией на демультиплексорах могут быть структурно упрощены в сочетании с МОЧМ при построении последних на основе ФФП или ВБР, что позволяет одновременно контролировать множество частот МС. В [35] продемонстрирована система МИЧ множества МС такого типа с использованием ФФП (рис. 5).

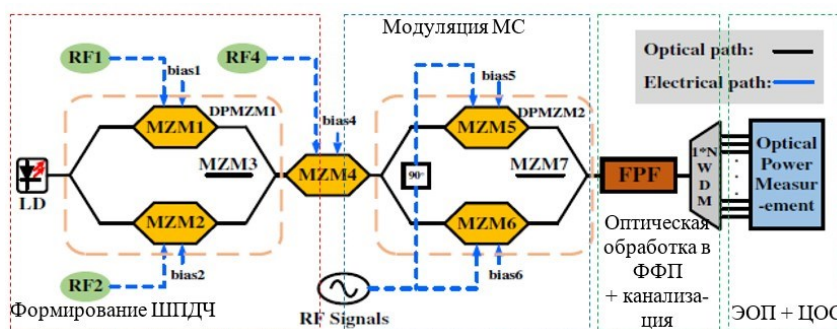


Рис. 5. Схема системы МИЧ множества частот МС, основанная на сочетании МОЧП и МОЧМ с неравномерным по амплитуде ШПДЧ и ФФП (адаптировано из [35])

Предложенная схема МИЧ множества МС содержит равномерный по амплитуде 14-ти компонентный ШПДЧ. ШПДЧ генерируется путем каскадного соединения двойного параллельного ММЦ (ДПММЦ) с АММЦ и поступает на второй ДПММЦ. МС с множеством неизвестных частот модулирует ШПДЧ во втором ДПММЦ и поступает на сканирующий ФФП, а далее на волновой демультиплексор и массив фотоприемников.

Эта схема позволяет анализировать наличие и измерять частоты МС в диапазонах 0,5–13,5 ГГц, 13,5–26,5 ГГц и 26,5–39,5 ГГц с погрешностью $\pm 0,5$ ГГц. Реконфигурируемость системы может быть реализована путем регулирования расстояния между компонентами ШПДЧ и свободного спектрального диапазона ФФП. Достигнуто упрощение схемы за счет исключения 90° оптических гибридов и балансных фотоприемников, а также одного из волновых демультиплексоров.

В работе [36] предложен инструмент разбиения измеряемого диапазона частот 2 – 12 ГГц на пять каналов (рис. 6).

Ширина канала и полосы пропускания фотоприемника составляет 2 ГГц (типовая ширина канала при МИЧ), а достигнутая потенциальная погрешность измерений составляет 2 МГц.

Для формирования пограничных частот каналов измерений используется однополосный генератор ШПДЧ на ДП ММЦ, отношение амплитуд составляющих которого определяет номер канала и задается специальной ВБР с множеством окон отражения/пропускания при различном их коэффициенте.

Верхняя составляющая измеряемой частоты, сформированная в однопортовом ММЦ интенсивности, смешивается в фотоприемнике с граничными частотами гребенки канала, внутри которого она находится, и по частотам биений и их амплитудам определяется искомая частота.

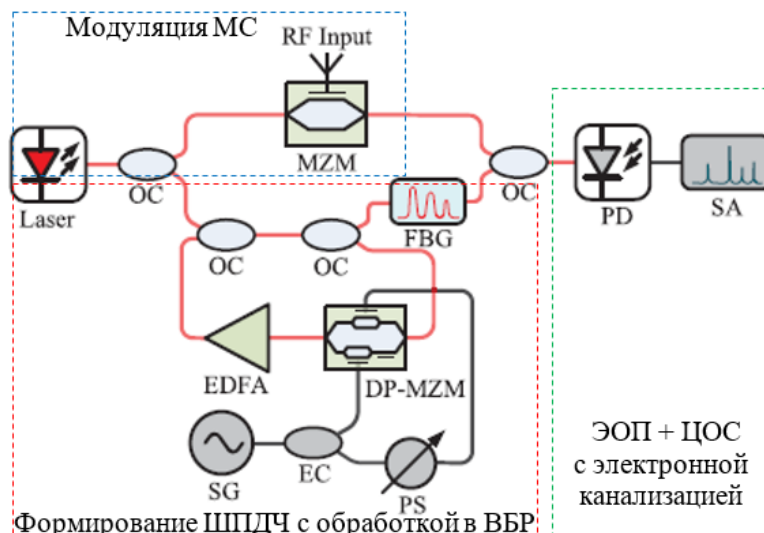


Рис. 6. Схема системы МИЧ множества частот МС, основанная на сочетании МОЧП и МОЧМ с неравномерным по амплитуде ШПДЧ и ВБР (адаптировано из [36])

В работе также рассмотрена возможность МИЧ нескольких МС одновременно. Дополнительно отметим переход от демультиплексоров к электронной канализации МС в электронных ВАЦ. При этом ВАЦ не следует рассматривать только как прецизионный дорогостоящий прибор, поскольку сегодня существует множество программных оболочек, реализующих его функции.

4. ШПДЧ в системах мгновенного измерения частот множества микроволновых сигналов на основе сочетания методов с отображением частота-пространство и частота-мощность симметричного типа

Анализ работ, представленных в разд. 2-3, позволил определить их как МИЧ несимметричного типа, т.е. в них применяется либо несимметричный относительно несущей частоты ШПДЧ, либо МС, перенесенный в оптический диапазон, с использованием однополосной модуляции. Указанным системам МИЧ присущи искажения модуляционных преобразований с однополосными преобразованиями и не до конца подавленной несущей, а также отсутствие полного использования мощности МС на измеряемой частоте.

В работе [37] описан способ реализации радиофотонного устройства МИЧ множества МС (рис. 7), реализующего технологию биений, на основе симметричной тандемной амплитудно-фазовой модуляции (ТАФМ) [38-40] и равномерного по амплитуде и частотному шагу ШПДЧ.

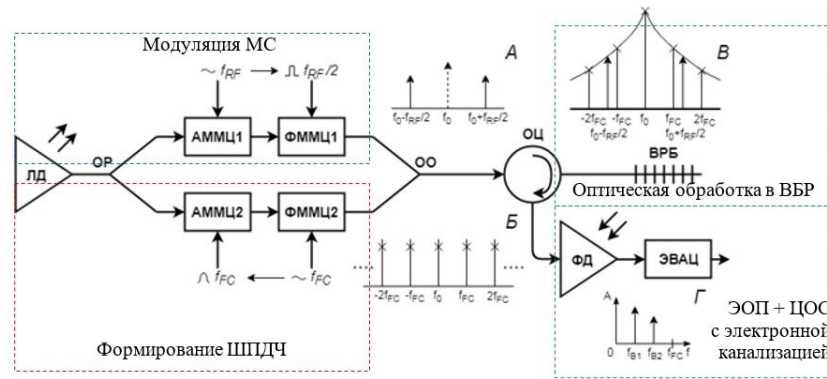


Рис. 7. Схема симметричной системы МИЧ множества частот МС, основанная на сочетании МОЧП и МОЧМ на базе ВБР с равномерным по амплитуде и частотному шагу ШПДЧ (адаптировано из [37])

При этом ТАФМ используется как для получения оптической двухчастотной копии МС с полностью подавленной оптической несущей, так и для создания ШПДЧ, который покрывает весь диапазон измерений и симметрично привязан к оптической несущей.

В верхнем канале в отличие от классических видов модуляции разностная частота между составляющими измеряемой частоты равна самой измеряемой частоте. Ее значение определяется на основе регистрируемых амплитуд и частот биений между составляющими измеряемой частоты и двумя парами симметрично расположенных компонент ШПДЧ, между которыми они находятся в конкретный момент времени. Полоса пропускания фотоприемника равна ширине полосы частот одного канала ШПДЧ и служит своего рода фильтром для подавления биений измеряемой частоты с другими компонентами пакета. Различение частот биений, попавших в различные каналы, осуществляется за счет использования ВБР с вогнутой формой АЧХ для дифференциации каналов по амплитуде регистрируемых сигналов биений.

Система МИЧ [37] позволяет получить выигрыш по сравнению не только с указанными выше системами, но и с другими известными решениями аналогичного типа [41-43] по точности измерений, полосе пропускания приемника, внутрисистемного мониторинга параметров при изменении параметров окружающей среды, что показано в работах [44, 45].

Однако, существенным недостатком упрощенных по структуре несимметричных и симметричных систем является наличие очень высоких требований к ФФП и ВБР по точности изготовления и по стабильности к изменению параметров окружающей среды.

Учитывая уже известные нам преимущества симметричных методов, в [32] предложена система МИЧ множества МС, которая существенно отличается от предложенной в [37] простотой реализации (рис. 8).

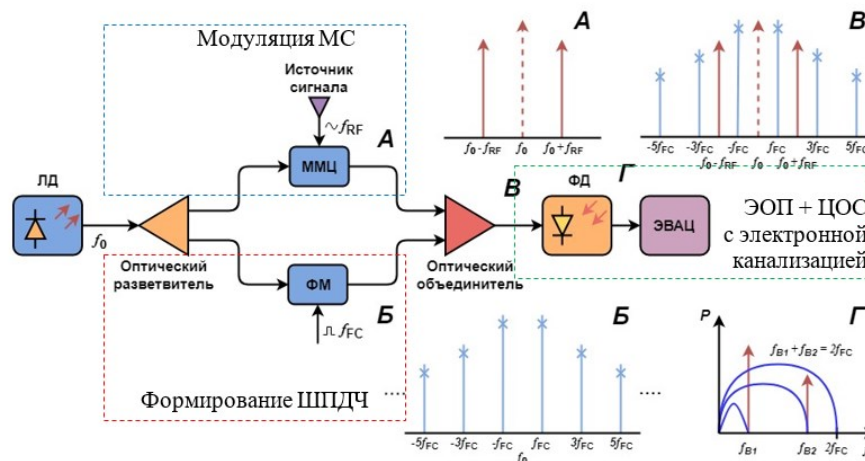


Рис. 8. Схема симметричной системы МИЧ множества частот МС, основанная на сочетании МОЧП и МОЧМ на базе двух модуляторов с подавлением несущей и неравномерным по амплитуде ШПДЧ (адаптировано из [32])

В верхнем плече системы для двухполосного формирования измеряемых оптических составляющих, соответствующих множеству МС, используется АММЦ, работающий в точке минимального пропускания, а в нижнем плече для формирования симметричного ШПДЧ с треугольной огибающей используется фазовый модулятор с коммутацией полу-волнового напряжения с частотой, равной частотному шагу пакета. В обоих случаях происходит подавление оптической несущей, что позволяет снизить требования по ее стабильности, поскольку все измерения отвязаны от ее конкретного значения и привязаны к значению пограничных частот каналов.

Электронная канализация осуществляется в ВАЦ, а характеристики последнего определяют разрешающую способность и погрешность измерений.

Итоговая величина погрешности составила по измеряемой частоте менее 1 МГц во всем диапазоне 0,01-20 ГГц и определялась в основном нестабильностью температуры лазера и ММЦ, для стабилизации которых применялись стандартные средства контроля и управления. Ширина одного канала ШПДЧ составляла стандартные 2 ГГц.

Заключение

Несмотря на достижения в технологиях радиофотонных систем МИЧ множества МС, остается ряд проблем, определяемых с одной стороны сложностью их структур, а с другой влиянием на элементы этих структур факторов окружающей среды, таких как колебания температуры и электромагнитные помехи, что снижает стабильность и точность измерений. Разработка методов, устойчивых к этим помехам, имеет решающее значение для дальнейшего прогресса радиофотонных систем МИЧ множества МС, как класса в целом, так, в частности, и систем, основанных на МОЧП в сочетании с МОЧМ. Перспективы в указанном подклассе систем включают непрерывную модернизацию применяемых методов формирования ШПДЧ от равномерных по шагу компонент и амплитуде к неравномерным по амплитуде, от несимметричных к симметричным. Это же относится и к методам модуляционного преобразования множества частотных составляющих МС от однополосных к двухполосным. При этом совершенствуются и методы обработки сигналов с переходом от подсистем демультимплексоров, 90° оптических гибридов и множества балансных фотоприемников к системам на одном фотоприемнике и электронном ВАЦ. Такой переход заменяет пространственную многополосную канализацию однополосной электронной с дискриминацией измеряемых частот по частотам биений компонент МС с компонентами ШПДЧ и по их амплитудам. Эти достижения направлены на преодоление существующих ограничений и достижение высокого уровня точности и надежности.

Каждый технологический прорыв основан на преодолении ограничений более ранних методов, внедряя инновационные решения, повышающие точность, стабильность и применимость систем МИЧ множества МС. Как направление дальнейших исследований можно предложить применение ШПДЧ с неравномерным шагом частот между компонентами. Оценки показывают возможность значительного снижения возникновения коллизий совпадения частот биений в разных по ширине каналах ШПДЧ. Исследованию этого вопроса будут посвящены дальнейшие работы авторов.

Работа выполнена в рамках государственного задания FZSU-2026-0009, рег. номер НИОКТР 126020516512-7.

Список литературы

1. Zobair M.A. Recent advances in multitone microwave frequency measurement / M.A. Zobair, B. Boroomandisorkhabi, M. Esmaeelpour // Sensors. – 2025. – 25. – P. 3611.

2. 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.
3. Zhou, Y. Microwave Photonic Filters and Applications / Y. Zhou, L. Wang, Y. Liu, Y. Yu, X. Zhang // *Photonics*. – 2023. – 10. – P. 1110.
4. Zou, X. Photonics for microwave measurements / X. Zou, B. Lu, W. Pan, L. Yan, A. Stöhr, J. Yao // *Laser Photonics Rev.* – 2016. – 10. – P. 711–734.
5. Bui, L.A. Recent advances in microwave photonics instantaneous frequency measurements / L.A. Bui // *Prog. Quantum Electron.* – 2020. – 69. – 100237.
6. Daulay, O. On-chip programmable microwave photonic filter with an integrated optical carrier processor / O. Daulay, R. Botter, D. Marpaung // *OSA Contin.* – 2020. – 3. - P. 2166–2174.
7. Liu, Y. High-performance chip-assisted microwave photonic functionalities. / Y. Liu, D. Marpaung, B.J. Eggleton, A. Choudhary // *IEEE Photonics Technol. Lett.* – 2018. – 30. – P. 1822–1825.
8. Romero Cortés, L. Towards on-chip photonic-assisted radio-frequency spectral measurement and monitoring / L. Romero Cortés, D. Onori, H. Guillet de Chatellus et al. // *Optica*. – 2020. – 7. – P. 434–447.
9. Jabin, M.A.; Fok, M.P. Data augmentation using a generative adversarial network for a high-precision instantaneous microwave frequency measurement system / M.A. Jabin, M.P. Fok // *Opt. Lett.* – 2022. – 47. – P5276–5279.
10. Liu, Q. Adaptive Photonic Microwave Instantaneous Frequency Estimation Using Machine Learning / Q. Liu, B. Gily, M.P. Fok // *IEEE Photonics Technol. Lett.* – 2021. – 33. – P.1511–1514.
11. Али М.А.М. Широкополосные и сверхузкополосные пакеты дискретных частот для решения задач спектральной настройки восходящих каналов волоконно-оптических транспортных доменов сетей доступа мобильной связи 5G+ / М.А.М. Али, В.С. Соколов, Р.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов, Р.Ш. Мисбахов // *Электроника, фотоника и киберфизические системы*. - 2025.- Т. 5.- № 1. С. 64-89.
12. Морозов О.Г. Фотонный метод генерации двухчастотных радионесущих для формирования диаграммы направленности линейных симметричных частотно-разнесенных антенных решеток / О.Г. Морозов, Г.С. Потапов, Г.А. Морозов, И.И. Нуреев, Т.Р. Шагвалиев // *Электроника, фотоника и киберфизические системы*. – 2025. – Т. 5. – № 4. – С. 37-47.
13. Wang, C. Ultrahigh-resolution photonic-assisted microwave frequency identification based on temporal channelization / C. Wang, J. Yao // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* – 2013, 61. – P. 4275–4282.
14. Huang, C. Frequency-To-Space Mapping based Instantaneous Frequency Measurement System with Improved Accuracy and Resolution / C. Huang, E.H.W. Chan, P. Hao // *In Proceedings of the 2023 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*, Nanjing, China, 15–18 October 2023.
15. Zhang, J.; Ma, D.; Li, P. Multifrequency measurement system with no frequency ambiguity based on two frequency-space mappings. Zhang, J.; Ma, D.; Li, P. *Opt. Eng.* 2025, 64, 038104.
16. Xie, X. Broadband photonic RF channelization based on coherent optical frequency combs and I/Q demodulators / X. Xie, Y. Dai, K. Xu et al // *IEEE Photonics J.* – 2012. – 4. – P. 1196–1202.
17. Zou, X. Photonic-assisted microwave channelizer with improved channel characteristics based on spectrum-controlled stimulated Brillouin scattering / X. Zou, W. Li, W. Pan et al.// *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* – 2013. –61. – P. 3470–3478.

18. Liu, J. High-Accuracy Multiple Microwave Frequency Measurement with Two-Step Accuracy Improvement Based on Stimulated Brillouin Scattering and Frequency-to-Time Mapping. / J. Liu, T. Shi, Y. Chen // *J. Light. Technol.* – 2021. – 39. – P. 2023–2032.
19. Zhang, B. Microwave frequency measurement based on an optically injected semiconductor laser. / B. Zhang, D. Zhu, H. Chen, Y. Zhou, S. Pan // *IEEE Photonics Technol. Lett.* – 2020. – 32. – P. 1485–1488.
20. Song, S. High-resolution microwave frequency measurement based on dynamic frequency-to-power mapping / S. Song, S.X. Chew, L. Nguyen, X. Yi. // *Opt. Express.* – 2021. – 29. – P.42553–42568.
21. Zhi, K. All-optical instantaneous RF signal frequency measurement system based on a linear ACF with a steep slope / K. Zhi, C. Huang, E.H.W. Chan, P.Hao, X.Wang // *Appl. Opt.* – 2024. – 63. – P. 2854.
22. Shi, J. Photonics-Based Broadband Microwave Instantaneous Frequency Measurement by Frequency- to-Phase-Slope Mapping / J. Shi, F. Zhang, D. Ben, S. Pan // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* – 2019. – 67. – 544–552.
23. Huang, C. Microwave frequency measurement based on a frequency-to-phase mapping technique / C. Huang, E.H.W. Chan // *Opt. Lett.* – 2022. – 47. – P.5957–5960.
24. Wang, T. Frequency-Phase-Mapping Method in Microwave Frequency Measurement With Single Optical Frequency Comb / T. Wang, Y. Yang, S. Xie, S. Luan, Y. Li // *IEEE Sens. J.* – 2024. – 24. – P. 12616–12623.
25. Gao, J. Photonic instantaneous microwave frequency measurement based on frequency-phase mapping with high precision / J. Gao, J. Ma // *Appl. Opt.* – 2023. – 62. – P. 8578–8586.
26. Wang, D.; Du, C.; Yang, Y.; Zhou, W.; Meng, T.; Dong, W.; Zhang, X. Wide-range, high-accuracy multiple microwave frequency measurement by frequency-to-phase-slope mapping / D. Wang, C. Du, Y. Yang et al./ *Opt Laser Technol.* – 2020. – 123. –P. 105895.
27. Zhu, Y.L. Switchable instantaneous frequency measurement by optical power monitoring based on DP-QPSK modulator / Y.L. Zhu, B.L. Wu, J. Li, M.G. Wang et al. // *Chin. Phys. B.* – 2022. – 31. – 044202.
28. Li, S. UWB real-time spectrum measurement based on microwave photonics / S. Li, Y. Liu, G. Xing, X. Ma, W. Yu et al. // *In Proceedings of the Seventeenth National Conference on Laser Technology and Optoelectronics, Shanghai, China, 23–26 August 2022.* – Vol. 12501. – P. 1250102.
29. Shi, N. A Compact Multifrequency Measurement System Based on an Integrated Frequency-Scanning Generator / N. Shi, T. Hao, W. Li, M. Li // *Appl. Sci.* – 2020. – 10. – 8571.
30. Zhu, W. Photonic Multiple Microwave Frequency Measurement System with Single-Branch Detection Based on Polarization Interference / W. Zhu, J. Li, M. Yan, L. Pei et al. // *Electronics.* – 2023. – 12. – 455.
31. Ji, Q. Broadband reconfigurable instantaneous microwave multifrequency measurement system based on a nonuniform optical frequency comb / Q. Ji, J. Zhang, J. Zhang, D. Ma // *Appl. Opt.* – 2024. – 63. – P. 7556–7565.
32. Maltsev A.V. A Simple Radiophotonic Device for Instantaneous Frequency Measurement of Multiple Microwave Signals Based on a Symmetrical Unequal Comb Generator / A.V. Maltsev, O.G. Morozov, A.A. Ivanov et al.// *Instruments and Experimental Techniques.* – 2023. – T. 66. – № 5. – P. 737-744.
33. Zhang, J.; Ji, Q.; Zhang, J. Wideband Reconfigurable Instantaneous Microwave Multi-frequency Measurement System Based on an Optical Frequency Shifter and Optical Frequency Comb. / Zhang, J.; Ji, Q.; Zhang, J. // *Curr. Opt. Photonics* 2025, 9, 43–54.
34. Zhu, W. Multiple microwave frequency measurement system based on a sawtooth-wave-modulated non-flat optical frequency comb / W. Zhu, J. Li, M. Yan, L. Pei et al. // *J. Appl. Opt.* – 2022. – 61. – P.10499–10506.

35. Yongfeng Wei. Measurement and analysis of instantaneous microwave frequency based on an optical frequency comb / Yongfeng Wei, Ximin Wang, Yingxi Miao et al. // *Applied Optics*. – 2022. – Vol. 61, No. 23. – P. 6834-6840.
36. Shen Z. Photonics-Assisted Non-Scanning High-Accuracy Frequency Measurement Using Low-Speed Components / Z. Shen, C. Jin, Q. He, Z. Zhang and Y. Zhao // in *IEEE Photonics Journal*, Aug. 2019. – Vol. 11, no. 4. – P. 1-8– Art no. 5501708.
37. 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, А.А. Иванов и др. // *Фотон-экспресс*. – 2019. – № 5(157). – С. 16.
38. Morozov, O.G. Spectrum conversion investigation in lithium niobate Mach–Zehnder modulator / O.G. Morozov, D.L. Aybatov // *Proc. SPIE*. – 2010. – V. 7523. – P. 75230D.
39. Morozov, O.G. RZ, CS-RZ, and soliton generation for access networks applications: problems and variants of decisions / O.G. Morozov // *Proc. SPIE Optical Technologies for Telecommunications 2011 (OTT 2011)*. – 2011. – V. 8410. – P. 84100P.
40. Morozov, O.G. Modulation methods of spectrally pure two-frequency radiation formation for microwaves carrier generation in optical range / O.G. Morozov, G.I. Il'in, G.A. Morozov // *Proc. of Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO)*. 7997544 (2017) – 2017. – P. 1–7.
41. Ivanov, A.A. Radiophotonic method for instantaneous frequency measurement based on principles of frequency–amplitude conversion in fiber Bragg grating and additional frequency separation / A.A. Ivanov, O.G. Morozov, V.A. Andreev, A.A. Kuznetsov and L.M. Faskhutdinov // *XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*. – 2017. – P. 427–430.
42. Ivanov, A.A. Microwave photonic system for instantaneous frequency measurement based on principles of "frequency–amplitude" conversion in Bragg grating and additional frequency separation / A.A. Ivanov [et al.] // *Proc. Of SPIE*. – 2016. – V. 10342. – P. 103421A.
43. Morozov, O.G. External amplitude–phase modulation of laser radiation for generation of microwave frequency carriers and optical poly–harmonic signals: an overview / O.G. Morozov [et al.] // *Proc. of SPIE*. – 2016. – V. 9807. – P. 980711.
44. Morozov, O.G. Bragg gratings slopes shape and the measurement error of the microwave signals instantaneous frequency / O.G. Morozov, I.I. Nureev, G.A. Morozov, A.A. Ivanov, A.Z. Sakhabutdinov // *Proc. of Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. – 2021. – P. 1–5.
45. Sakhabutdinov A.Z. Bragg wavelength temperature shift and the measurement error of the microwave signals instantaneous frequency / A.Z. Sakhabutdinov, I.I. Nureev, G.A. Morozov, A.A. Ivanov, A.A. Tyazhelova // *Proc. of Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. – 2021. – P. 1–5.

DEVELOPMENT ANALYSIS OF INSTANTANEOUS FREQUENCY MEASUREMENT SYSTEMS OF MULTIPLE MICROWAVE SIGNALS BASED ON WIDEBAND DISCRETE FREQUENCY PACKETS

L.D. Ibragimov, A.A. Ivanov, I.I. Nureev, O.G. Morozov, G.A. Morozov

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

Annotation. This review examines modern microwave photonic methods for instantaneous frequency measurement of microwave signals, highlighting their clear advantages and challenges in detecting

multi-frequency and wideband variants. Various optical processing methods for instantaneous frequency measurement are discussed in detail, including frequency-space mapping (channelization) methods, including those combined with frequency-power mapping. Methods for generating and using wideband discrete frequency packets as the basis for implementing channelization and frequency measurement methods, as well as procedures for transferring measured microwave signals to the optical range using specialized modulation techniques, are separately considered. These modern advances collectively expand the ranges and improve the accuracy of microwave signal frequency measurements, offering reliable and scalable solutions for a variety of applications, including radar, telecommunications, and others.

Keywords: instantaneous frequency measurement, microwave signal, wideband discrete frequency packets, frequency-space mapping, frequency-power mapping, microwave photonic systems.

Статья представлена в редакцию 10 марта 2026 г.