

РАДИОФОТОННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ СВЧ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХУЗКОПОЛОСНЫХ ЧАСТОТНЫХ ДИСКРИМИНАТОРОВ – РЕЗОНАТОРОВ И УСИЛИТЕЛЕЙ. ОБЗОР

А.В. Мальцев, А.А. Иванов

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

Аннотация. Создание новых фотонных и микроволновых технологий и сопутствующей им элементной базы привело к значительному прогрессу в развитии методов и средств измерения мгновенной частоты (ИМЧ) СВЧ-сигналов, построенных на основе радиотонных подходов. Электронные ИМЧ СВЧ-сигналов в настоящее время повсеместно используемые как в военных, так и в гражданских областях, к примеру, в системах радиоэлектронной борьбы, оценки электромагнитной обстановки и совместимости РЭС и др., позволяют решать множество задач, однако их применение ограничивается канальными решениями с частотным диапазоном 2 ГГц из-за ограничений электронных схем. Благодаря фотонным системам появилась возможность значительно расширить диапазон измеряемых частот, точность и разрешающую способность фотонных приемников в одном канале, как минимум, до 10-40 ГГц. К примеру, использование ИМЧ СВЧ-сигналов на основе вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна с усилением позволяет проводить измерения в диапазоне от 0.5 до 28 ГГц с разрешающей способностью в 20 МГц. Близкие или лучшие характеристики можно получить с помощью интегральных кольцевых резонаторов и резонаторов Фано. При этом работы по созданию методов и средств ИМЧ на основе частотных дискриминаторов резонансного типа, основывались на измерении оптической мощности несущего лазерного сигнала, модулированного СВЧ сигналом. В данной статье дан обзор подходов, в которых используются сверхузкополосные частотные дискриминаторы на основе указанных резонаторов и усилителей. Подробно рассмотрены принципы их работы, а также связанные с ними преимущества, недостатки и существующие решения выявленных проблем.

Ключевые слова: радиотоника, измерение мгновенной частоты, сверхузкополосный частотный дискриминатор, интегральный кольцевой резонатор, интегральный резонатор Фано, усилитель на основе вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.

Введение

Радиотонное измерение мгновенной частоты одного или множества СВЧ-сигналов подразумевает измерение спектральных параметров (частоты и амплитуды) лазерной несущей, промодулированной ими [1]. Одним из наиболее часто применяемых принципов определения мгновенной частоты СВЧ-сигнала является частотно-амплитудная дискриминация преобразование «частота-амплитуда», заключающееся в прохождении измеряемых частотных компонент через дискриминатор резонансного или избирательно усилительного типа [1–8]. Прошедшие измеряемые частотные компоненты будут изменять свою амплитуду согласно АЧХ дискриминатора со сверхузкополосной избирательностью. Зная АЧХ среды дискриминатора, можно провести оценку изменения амплитуды измеряемых частотных компонент в зависимости от того, на какой частоте АЧХ находится измеряемая компонента и построить так называемую функцию сравнения амплитуд (ФСА) [9–11].

В последние годы было опубликовано достаточно большое количество обзоров, в которых рассматривались существующие методы и средства ИМЧ СВЧ-сигналов. Однако

в этих обзорах, как правило, рассматривались только общие вопросы, связанные с применением фотоники и радиофотоники в микроволновых измерениях [12, 13], основанные на преобразованиях частоты в амплитуду, фазу, время и пространство [14, 15]. Дискриминаторы селективного амплитудного типа со сверхузкополосной избирательностью [16-21] в обзорах не обсуждались, что привело к необходимости рассмотрения систем на основе таких дискриминаторов и сравнительного анализа способов их реализации и достигнутых характеристик, а также путей улучшения метрологических характеристик.

Первая публикация [22] по разработке когерентной радиолокационной системы, полностью основанной на фотонике, была представлена в 2014 г. с предложениями по дальнейшему ее развитию в части расширения диапазона измеряемых частот и улучшения разрешающей способности. Требования к фотонным передатчикам и приемникам для решения задач ИМЧ СВЧ-сигналов, описанные в [22], представлены в таблице 1.

Таблица 1. Требования к производительности фотонного радиолокационного приемопередатчика (адаптировано из [22])

Параметр	Фотонный приёмопередатчик
	Передатчик
Несущая частота	Перестраиваемая генерация 0,04-40 ГГц
Соотношение сигнал/шум	>73 дБ/МГц
Динамический диапазон	>70 дБ
Мгновенная полоса частот	200 МГц
	Приемник
Принимаемая полоса частота	40 ГГц
Мгновенная полоса частот	200 МГц
Динамический диапазон	50 дБ
Эффективное число бит	>7 для несущей частоты до 40 ГГц

Ключевые отличия методов реализации заключаются в выборе физического эффекта усилительной и резонансной дискриминации, на основе которых реализуется система ИМЧ СВЧ-сигналов. По способу измерения различают системы ИМЧ СВЧ-сигналов на основе интегральных кольцевого резонатора и резонатора Фано, а также формирования контура усиления вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.

В связи с обширным списком возможностей реализации систем ИМЧ на основе дискриминаторов резонансного типа появляется необходимость проведения комплексного анализа всех основных типов подходов, используемых для реализации фотонных приемников, их способов реализации, достоинств, недостатков и способов их минимизации или устранения, а также достигнутых численных характеристик текущих разработок на их основе.

1. Измерение мгновенной частоты СВЧ-сигналов на основе интегрального кольцевого резонатора

Способ реализации ИМЧ СВЧ-сигналов заключается в использовании интегрального кольцевого резонатора (ИКР) в качестве сверхузкополосного частотного дискриминатора [23, 24]. Данный способ предложен в ряде работ и в качестве своего основного достоинства имеет возможность реконфигурации по частоте путем управления температурой чипа с кольцом, что в свою очередь позволяет достичь полностью настраиваемой ФСА [25–28]. Устройства на основе ИКР обеспечивают вышеописанные

предъявляемые требования по диапазону частот и точности измерения, к примеру, в [29] представлена практическая реализация системы ИМЧ СВЧ-сигналов с ИКР с портами ввода-вывода, выполненным на кремниевом чипе, и продемонстрирована работа системы с двумя кольцами с высокой ($Q=25833$) и низкой ($Q=3974$) добротностью для покрытия частотного диапазона в 0.1-5 ГГц и 0.5-35 ГГц соответственно. Достигнутая точность измерений составила 63 МГц для диапазона частот в 0.1-5 ГГц и 240 МГц для диапазона частот в 0.5-35 ГГц. В качестве достоинства подобной реализации системы можно указать, что кольцо реализуется в интегральной форме, что делает систему устойчивой к физическим воздействиям.

1.1 Принцип работы

Принцип работы ИМЧ СВЧ-сигналов с ИКР в виде обобщенной блок-схемы показана на рис. 1 [29].

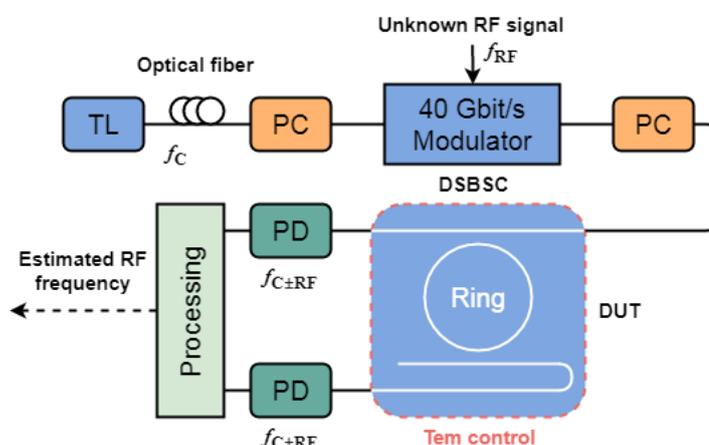


Рис. 1. Принципиальная схема системы ИМЧ СВЧ-сигналов с кремниевым ИКР:

TL – перестраиваемый лазер; PC – контроллер поляризации;
 DSBSC – двухполосная модуляция с подавленной несущей;
 DUT – кремниевый ИКР; PD – фотодиод (адаптировано из [29])

Генерируемое лазером одночастотное узкополосное излучение, с длиной волны равной резонансной длине волны ИКР, попадает на вход ММЦ, работающий в нулевой рабочей точке для подавления несущей, на модулирующий порт которого поступает измеряемый СВЧ-сигнал с неизвестной частотой f_{RF} .

Промодулированный сигнал затем поступает в волновод, совмещенный с ИКР, спектр пропускания которого представлен на рис. 2,а,в, где часть мощности перераспределяется в ИКР и, пройдя его, выводится с порта вывода ИКР; сквозной сигнал, прошедший волновод и полученный с порта вывода ИКР, спектр пропускания которого в свою очередь представлен на рис. 2,б,г, поступает на соответствующие этим каналам фотодетекторы.

В дальнейшем производится измерение мощности сигналов биений с их выходов и вычисление отношения этих мощностей, что позволяет построить ФСА для данного ИКР (рис. 3,а,б). Отмечена возможность построения как узкополосных, так и широкополосных ИМЧ СВЧ-сигналов с высокой разрешающей способностью для первых.

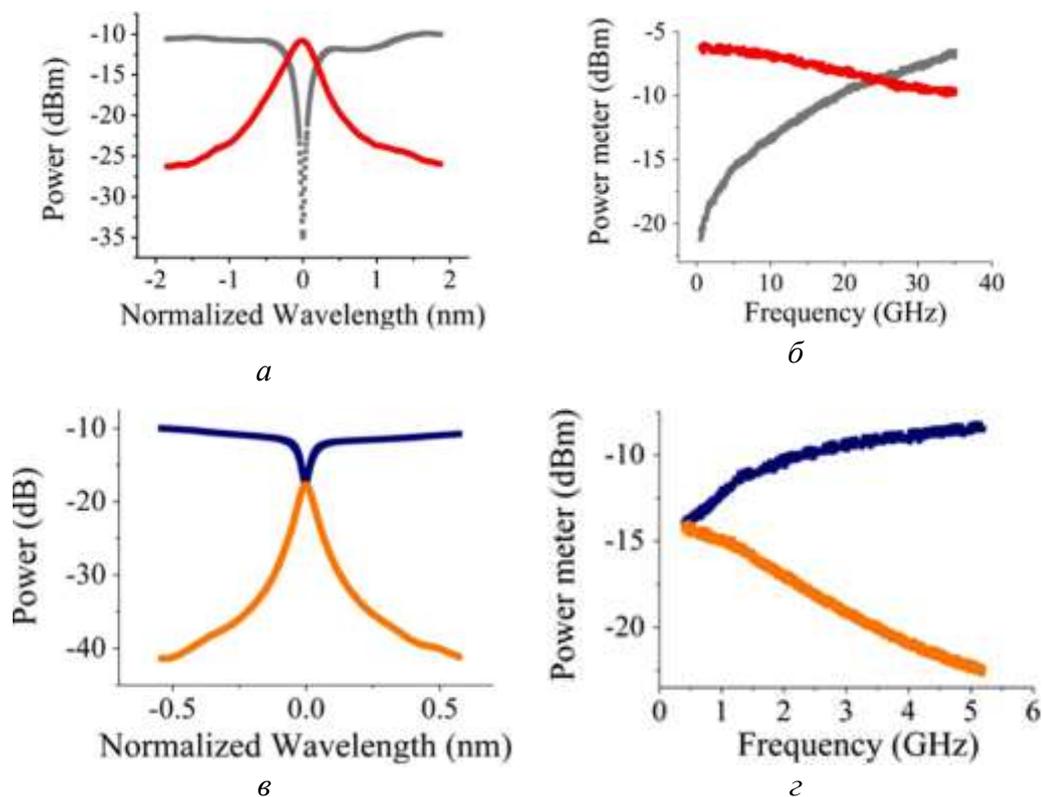


Рис. 2. Измеренные спектры передачи и выходные мощности прошедшего сигнала и сигнала с выхода ИКР: для системы ИМЧ СВЧ-сигналов с диапазоном частот 0,5–35 ГГц соответственно (а) и (б); для системы ИМЧ СВЧ-сигналов с диапазоном частот 0,1–5 ГГц соответственно (в) и (г) [29]

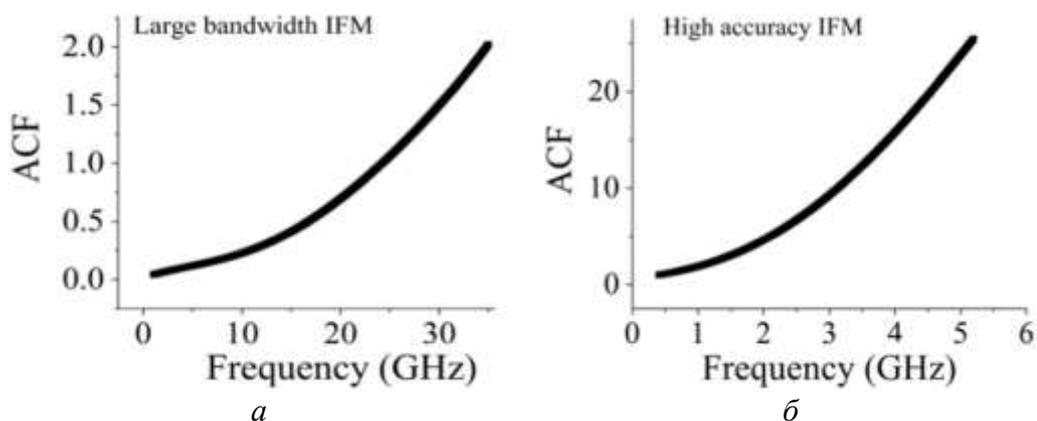


Рис. 3. Опорная ФСА в зависимости от частоты входного сигнала: для системы ИМЧ СВЧ-сигналов с диапазоном частот 0,5–35 ГГц (а); для системы ИМЧ СВЧ-сигналов с диапазоном частот 0,1–5 ГГц (б) [29]

1.2 Анализ погрешностей и методы повышения точности измерений

Помимо таких источников погрешностей как нестабильность частоты излучения лазерного источника, рабочей точки модулятора (при использовании ММЦ) и различие характеристик фотодетекторов, основное влияние на величину погрешности измерения оказывает несимметричность склонов АЧХ ИКР и неравномерное изменение амплитуды огибающей для каждого из склонов как, к примеру, показано на рис. 4 [30].

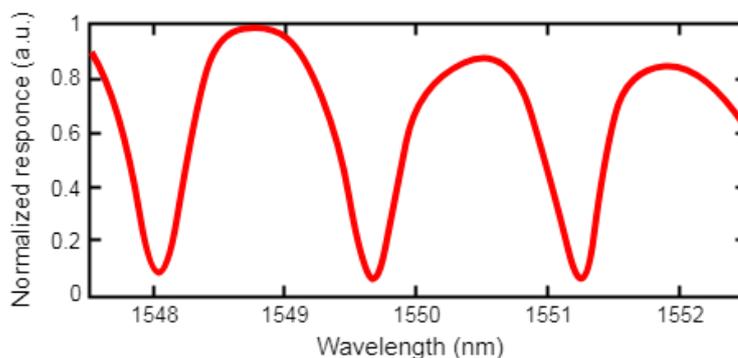


Рис. 4. Нормализованный спектр пропускания МКР (адаптировано из [30])

Данная проблема может быть решена путем изменения ширины и диаметра кольца, длины области связи, расстояния от волновода до кольца, что позволит настроить коэффициент связи и наклон положительного и отрицательного склона АЧХ ИКР. Данная операция потребует физической перестройки кольца микроманипуляциями с применением микроскопа. Также ИМЧ на ИКР не лишен проблем, аналогичных с ИМЧ на основе ВБР, а именно наличия участков монотонного изменения огибающей АЧХ в области низких частот. Данная проблема, однако, может быть решена путем применения уже упомянутых параллельных колец для покрытия отдельных поддиапазонов ИКР с высокой добротностью.

Другой предполагаемый способ заключается в применении одновременно нескольких параллельных или каскадированных ИКР, покрывающих определённые участки измеряемого диапазона для одновременного обеспечения широкой полосы измеряемых частот и высокой точности измерения. Так, в работе [29] использовалось два кольцевых резонатора с разной величиной расстояния между волноводом и кольцом (зазора) для управления коэффициентом связи и Q-факторами резонаторов и, как следствие, рабочим диапазоном частот. К примеру, первое кольцо с зазором 300 нм имело Q-фактор равный 3974 и рабочий частотный диапазон 0.5-35 ГГц. Второе кольцо с зазором 700 нм и Q-фактором равным 25833 имело рабочий частотный диапазон 0.5-5 ГГц. Дополнительное улучшение производительности системы в плане точности измерения может быть достигнуто путем интегрирования лазера, электрооптического модулятора, ИКР и фотоприёмников в единый монолитный фотонный чип [31].

1.3 Обсуждение результатов

Результат сравнительного анализа разработок по теме ИМЧ СВЧ-сигналов на ИКР и достигнутые в них характеристики приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики методов ИМЧ на основе ИКР

Ссылка	Технология	Диапазон, ГГц	Погрешность измерения, ГГц
[29]	Двухполосная модуляции с подавленной несущей	0.5-35	±0.024
[30]	Фазовая модуляция	0.5-12	±0.4
[31, 32]	Двухполосная модуляции с подавленной несущей	2-34	±0.0185
[33]	Фазовая модуляция	0.5-4	±0.0936

Наилучшие результаты в плане погрешности измерения показала работа [33] с полной интеграцией радиофотонной части на чипе, включая соединение с DFB-лазером на InP (рис. 5).

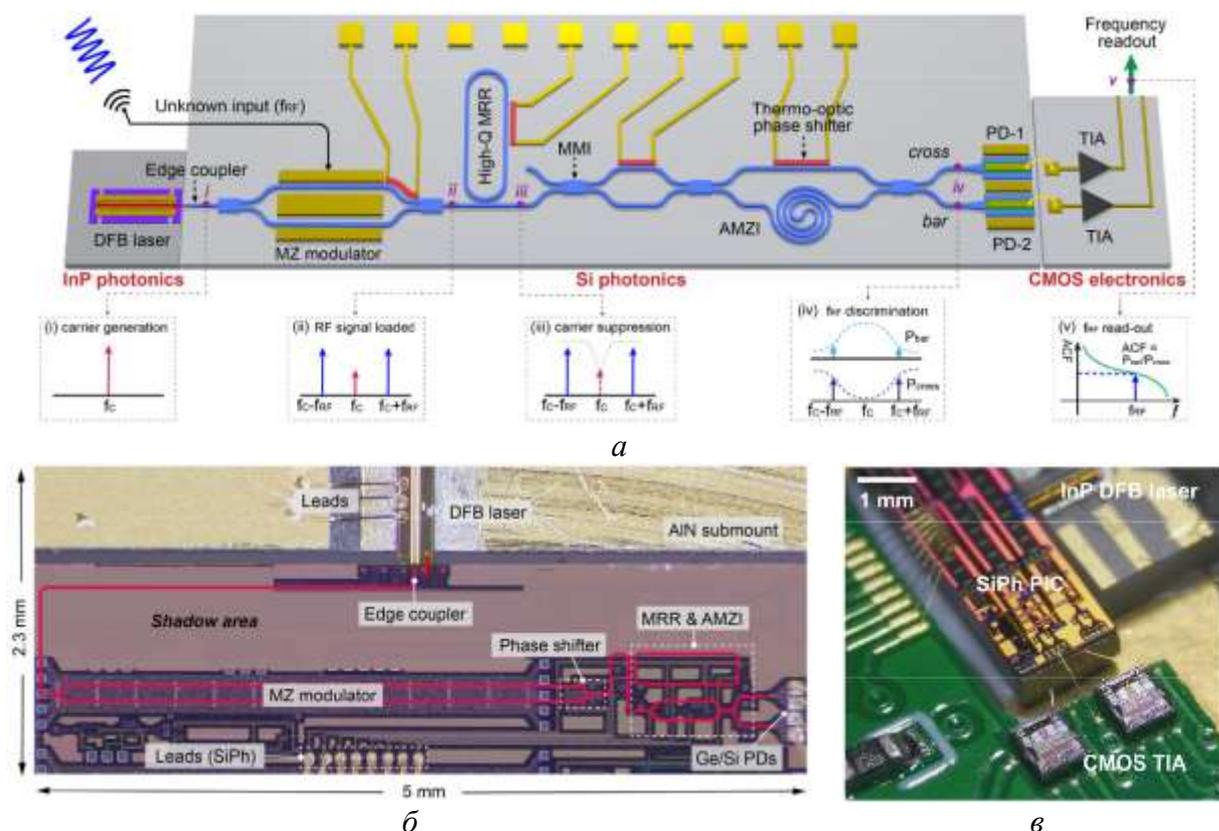


Рис. 5. Радиофотонная система ИМЧ СВЧ-сигналов на едином кристалле: принципы работы системы (а); фотография системы, включая вход DFB-лазера на InP (б); фотография реализованной на кристалле системы (в) [33]

Предложения по повышению эффективности оптических соединений приведены в [34], гетерогенная интеграция для повышения компактности и возможности масштабируемости системы обсуждается в [35], возможность снижения производственных затрат путем интеграции маломощных трансимпедансных усилителей с фотонной частью на монолитной платформе доказана в [36].

2. Измерение мгновенной частоты СВЧ-сигналов на основе резонаторов Фано

ИМЧ на основе резонанса Фано [37, 38] как правило реализуется на основе микрокольцевого резонатора путем интерференции двух резонансных волн в резонаторе, что приводит к возникновению резонанса Фано – сверхузкого асимметричного по профилю относительно центральной частоты (по сравнению с Гауссовым или Лоренцовым профилем) контура усиления, который может быть использован для селективного усиления гармоник измеряемого сигнала на склоне резонансной кривой для построения функции сравнения амплитуд за счёт измерения мощностей сигналов с портов резонатора и волновода и дальнейшего определения частоты неизвестного сигнала [39, 40]. Форма контура такого резонанса может быть перестраиваемой путём контроля фаз двух интерферирующих волн, распространяющихся в микрокольцевом резонаторе и волноводе,

к примеру, путём нагрева кольца. Ширина профиля резонанса Фано по частоте составляет вплоть до 1-5 МГц [38] что позволяет проводить сверхвысокоточные измерения (рис. 6).

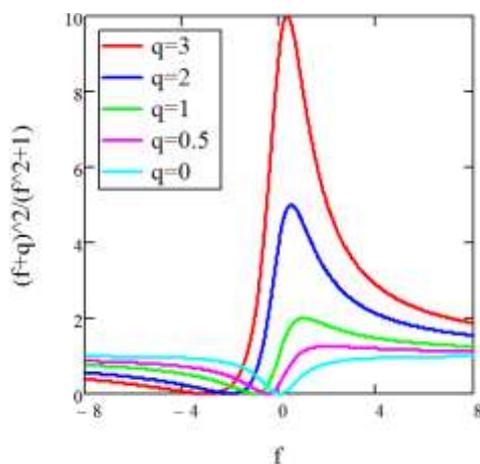


Рис. 6. Резонанса Фано в фотонике (адаптировано из [38])

В работе [31] экспериментально показана возможность измерения мгновенной частоты СВЧ-сигнала в полосе частот 15 ГГц с точностью измерения в ± 0.5 МГц.

2.1 Принцип работы

Принцип работы ИМЧ на основе резонанса Фано в виде обобщенной блок-схемы показан на рис. 7 [41].

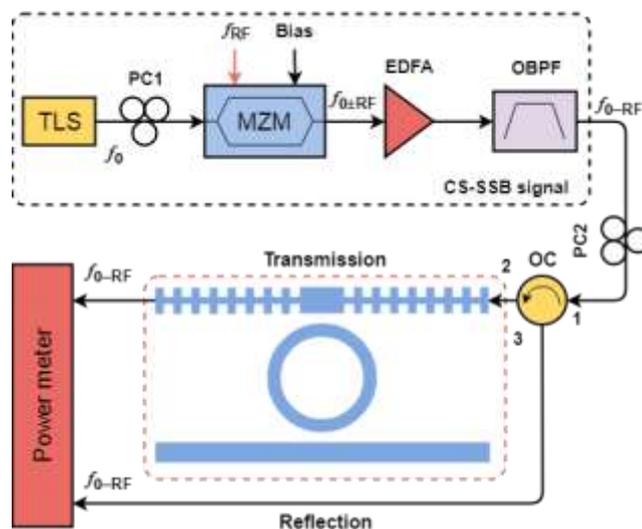


Рис. 7. Принципиальная схема системы ИМЧ на основе резонанса Фано: TLS – перестраиваемый лазерный источник; PC – контроллер поляризации; MZM – модулятор Маха-Цандера; EDFA – усилитель на эрбиевом волокне; OBPF – оптический полосовой фильтр; OC – циркулятор (адаптировано из [41])

Принцип работы по сути схож с принципом работы ИМЧ на основе ИКР. Перестраиваемый лазерный источник генерирует узкополосное излучение на частоте f_0 , которое поступает в электрооптический модулятор Маха-Цандера, работающего в нулевой рабочей точке модуляционной характеристики для подавления несущей, где модулируется СВЧ-сигналом с неизвестной частотой f_{RF} , поступающего на модулирующий порт модулятора.

Выходное излучение будет представлять собой двухчастотный сигнал с подавленной несущей, который затем усиливается в эрбиевом волоконном усилителе перед прохождением оптического полосового фильтра, в котором выделяется левая боковая полоса, которая подаётся в чип с ИКР Фано. Так как резонанс Фано будет изменять свой спектральный отклик при изменении температуры, последняя должна оставаться стабильной, что потребует применения в структуре чипа высокоточного устройства ее мониторинга.

Сам ИКР Фано состоит из волновода со встроенным резонатором Фабри-Перо, кольцом и волноводом с портами ввода-вывода. Проходящий волновод помимо резонатора Фабри-Перо содержит по обе его стороны решётки Брэгга, служащие в роли отражателей. Выбор периода решеток и длины полости резонатора будет определять резонансные моды ИКР Фано и за счет подбора фазы будет определяться форма асимметричного профиля резонанса Фано, участок АЧХ которого в дальнейшем используется для измерения мощности сигналов в портах прохождения и вывода для построения функции сравнения амплитуд.

2.2 Анализ погрешностей и методы повышения точности измерения

Резонанс Фано формируется в результате интерференции двух волн, распространяющихся в решетчатом волноводе с интерферометром Фабри-Перо и ИКР с портами ввода/вывода, где резонансная мода интерферометра Фабри-Перо интерферирует с резонансной модой ИКР [41].

Отсюда следует вывод, что любое внешнее воздействие или изменение режима работы элемента, входящего в измерительную систему, приводящее к изменению параметров и условий распространения резонансных мод приведет к изменению спектральных параметров резонанса Фано и к искажению результатов измерения. Основным внешним воздействием на измерительную систему является изменение рабочей температуры, которое приведёт к изменению режима работы лазера, электрооптического модулятора, изменения геометрических размеров решетчатого волновода с интерферометром Фабри-Перо (расстояния между стенками интерферометра и периода решетчатого волновода) и ИКР (диаметра и ширины кольца), а также расстояния между волноводом и ИКР, что приведёт к изменению коэффициента связи.

Анализ влияния температуры на параметры лазера и модулятора описаны отдельно во множестве работ. В работе [41] для проведения экспериментов потребовался контроль температуры в пределах менее 0.01 °С, что определяет необходимость строгого контроля температуры с применением механизмов стабилизации либо дополнительного оборудования. Из внутренних воздействий основным является мощность излучения лазера и коэффициента усилителя, увеличение значений которых приведет к увеличению соотношения сигнал/шум и уменьшению погрешностей измерения. Так как точность измерения определяется шириной полосы частот, которая зависит от крутизны наклона спектральной характеристики огибающей резонанса Фано, она будет определяться коэффициентом связи между волноводом с интерферометром Фабри-Перо и ИКР.

2.3 Обсуждение результатов

К сожалению, методы ИМЧ на основе резонанса Фано представлены только одной публикацией от 2019 года [41], в которой один из склонов асимметричной формы резонанса Фано использовался в виде наклонного фильтра с линейной АЧХ, покрывающей диапазон измеряемых частот в 15 ГГц, путем генерации на выходе ММЦ двухчастотных компонент с подавленной несущей, работающей в нулевой рабочей точке модуляционной

характеристики, фильтрации только левой боковой полосы, попадающей в полосу усиления резонанса Фано и регистрации ее мощности в каналах пропускания и отражения (рис. 8)

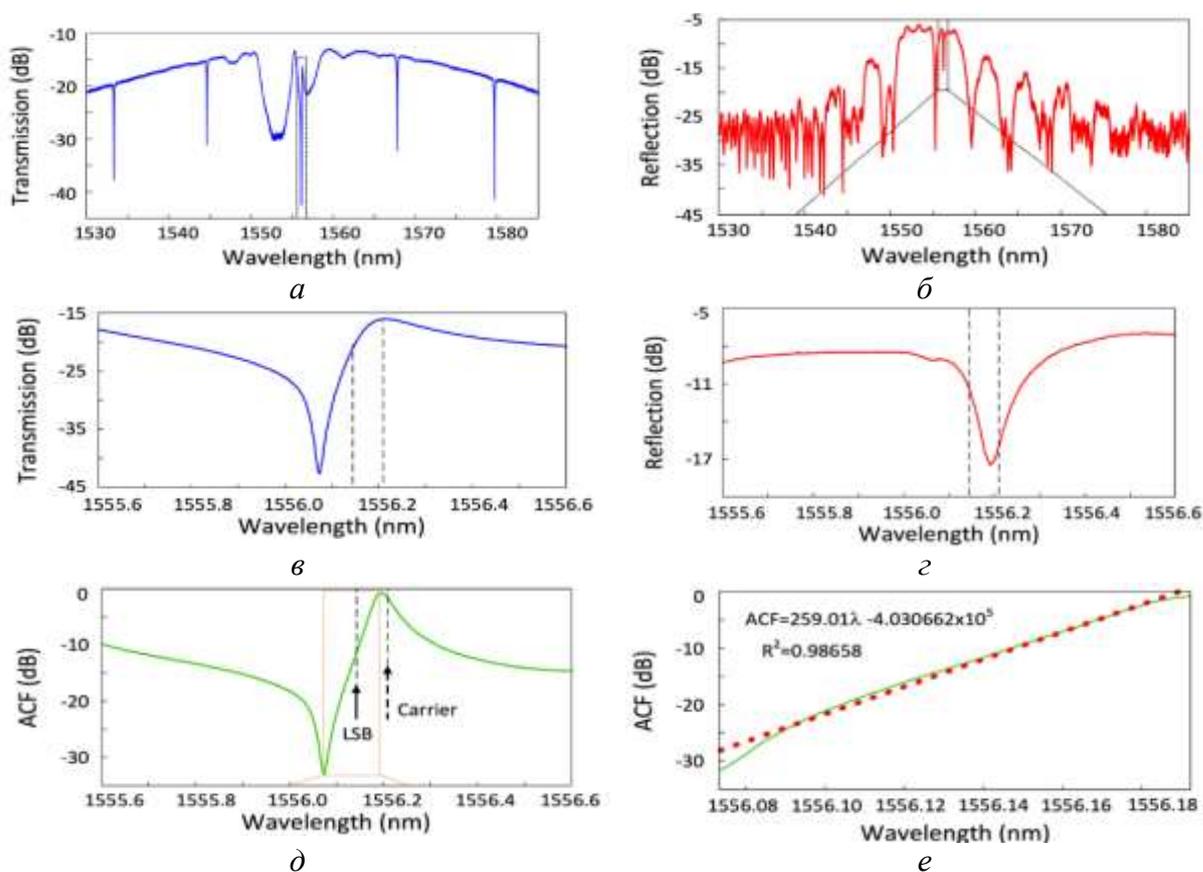


Рис. 8. ИМЧ на основе резонатора Фано: спектральная характеристика пропускания (а); спектральная характеристика отражения (б); увеличенные изображения области резонанса Фано (в, г); ФСА (д); ФСА с линейной подгонкой (е) [41]

В данной работе достигнута погрешность измерения составляет 5 МГц, что на порядок больше предъявляемых к подобным системам требований (таблица 1).

Альтернативным способом реализации ИМЧ на резонаторе Фано является создание сверхузкополосного контура усиления в 1-5 МГц с большой добротностью и внеполосным подавлением с симметричными склонами, который будет работать в виде избирательного частотного фильтра, с помощью которого возможно будет осуществлять сканирование измеряемого диапазона частот. Как было сказано выше, для реализации и поддержания формы АЧХ резонанса Фано предъявляются строгие требования по контролю температуры, что при реализации на основе дискретной элементной фотоники могло бы представить некоторые конструктивные сложности, однако, как к показано в [41], интегральная реализация значительно упрощает поддержание требуемого температурного диапазона и повышает общую производительность системы ввиду более простого контроля рабочих режимов элементной базы и малых потерь мощности. Для улучшения характеристик таких ИМЧ СВЧ-сигналов возможно применение прецизионных частотных гребенок, построенных на основе теории сверхузкополосного пакета дискретных частот (СПДЧ) [42].

3. Измерение мгновенной частоты СВЧ-сигналов на основе контура усиления вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна

Методы ИМЧ на основе контура усиления вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (КУВРМБ) [43–45] основаны на селективном усилении и поглощении боковых компонент оптической несущей, модулированной измеряемым СВЧ-сигналом в контурах усиления/поглощения ВРМБ, которые создаются путём использования дополнительного лазерного источника накачки. При этом центральная частота контуров усиления/поглощения уникальная и фиксирована для каждой из волоконных сред [46, 47].

Так как в средствах ИМЧ на основе КУВРМБ такой средой является преимущественно кварцевое оптическое волокно, частота КУ составляет порядка $\pm 10,48$ ГГц от частоты лазера накачки [48]. Ширина КУВРМБ составляет ~ 20 -100 МГц, что определяет разрешающую способность измерения частоты неизвестного сигнала подобных систем при одночастотном анализе.

Частотный диапазон измерения определяется диапазоном частот перестройки лазера накачки. К примеру, в работе [49] продемонстрирована реализация ИМЧ на основе КУВРМБ в диапазоне частот 9-38 ГГц с рекордной на данное время погрешностью измерения в 1 МГц.

3.1 Принцип работы

Принцип работы ИМЧ СВЧ-сигналов на основе КУВРМБ в виде обобщенной блок-схемы показана на рис. 9 [50].

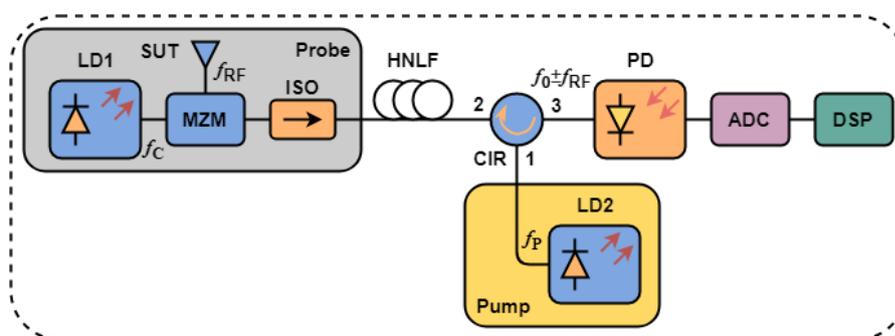


Рис. 9. Базовая структура системы ИМЧ на основе КУВРМБ:

- LD – лазерный диод; SUT – тестируемый сигнал; MZM – модулятор Маха-Цендера;
- ISO – изолятор; HNLF – высоконелинейное волокно; CIR – циркулятор;
- PD – фотодетектор; ADC – аналого-цифровой преобразователь;
- DSP – цифровой сигнальный процессор (адаптировано из [50])

Узкополосное оптическое излучение с частотой f_0 , генерируемой источником лазерного излучения поступает в ММЦ, работающий в нулевой рабочей точке для подавления несущей, где модулируется СВЧ-сигналом с неизвестной измеряемой частотой f_{RF} , поступающей на модулирующий порт ММЦ. Сигнал на выходе ММЦ будет представлять собой двухчастотный сигнал с подавленной несущей и двумя составляющими $f_0 - f_{RF}$ и $f_0 + f_{RF}$, который затем проходит через изолятор и поступает на участок нелинейного волокна. Оптический сигнал с лазера накачки с частотой f_P поступает на участок нелинейного волокна с противоположной стороны и при достижении порога возникновения ВРМБ инициирует контуры его усиления и поглощения.

При фиксированной частоте лазера накачки f_P на частотах $f_P - f_{ВРМБ}$ и $f_P + f_{ВРМБ}$ формируются контуры усиления/поглощения ВРМБ. Частота накачки определяет диапазон изменяемых частот и выбирается таким образом, чтобы измеряемые компоненты $f_0 - f_{RF}$

и $f_0 + f_{RF}$ попадали в контуры усиления/поглощения, и путём изменения частоты накачки проводится сканирование всего измеряемого диапазона. Так как ширина КУВРМБ составляет порядка 20-100 МГц для сканирования всего измеряемого диапазона частот, частота лазера накачки, возбуждающего контур ВРМБ, перестраивается дискретно с шагом, равным диапазону частот, соответствующему половине ширины контура усиления/поглощения для попадания гармоник измеряемых частот на линейный участок его огибающей и равномерного перекрытия измеряемого диапазона частот, при котором каждый следующий поддиапазон частично перекрывается предыдущим для построения множественных ФСА для каждого поддиапазона. Визуальное представление принципа представлено на рис. 10.

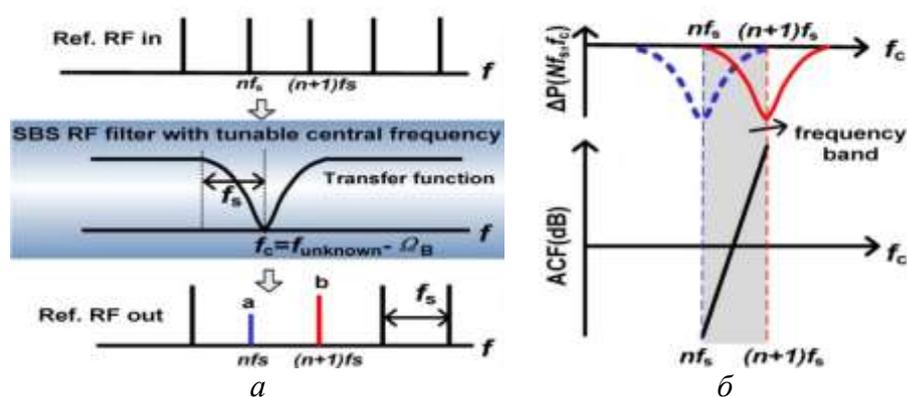


Рис. 10. Принцип работы ИМЧ на основе КУВРМБ: Сетка измеряемых частот и ее взаимодействие с КУВРМБ (а); аналитическая связь между частотой неизвестного СВЧ-сигнала и изменением мощности в каждом канале ИМЧ и результирующее отображение ФСА (б) [49]

В результате при совпадении положения боковых полос с контуром усиления их мощности соответственно будут усилены. Если мы изменим f_p , мы будем сканировать с помощью контуров усиления спектральные положения частот, которые лежат между самой низкой и самой высокой значениями частоты перестройки лазера накачки, что будет определять измеряемый частотный диапазон. После усиления мощность сигнала регистрируется на фотодетекторе и через ФСА определяется его частота [51].

3.2 Анализ погрешностей и методы повышение точности измерения

Основные причины погрешностей измерения для систем ИМЧ на основе ВРМБ помимо стандартных источников погрешности таких, как нестабильность частоты сигнального лазера и положения рабочей точки электрооптического модулятора являются температурная и спектральная нестабильность лазера накачки и температурные колебания окружающей среды участка волокна системы, в которой возбуждается КУВРМБ.

Температурная нестабильность частоты излучения лазера приводит к изменению положения центральной частоты контура в данном поддиапазоне, а колебания ширины спектра лазера приводят к изменению ширины КУВРМБ, что соответственно изменяет характер перекрытия поддиапазонов при перестройке частоты лазера накачки, так как ширина стоксовых компонент ВРМБ не менее чем в 10^4 уже ширины полосы излучения лазера [52].

Дополнительные погрешности могут вызвать спонтанные эмиссии как процессы случайного возмущения амплитуды и фазы лазера накачки, что приведет к спонтанным возмущениям обратно распространяющейся акустической волны, которая аналогична фазе

лазера накачки. Изменение температуры окружающей среды системы приведет к натяжению/сжатию волокна, что в свою очередь приведет к смещению частоты Бриллюэна.

Напрямую повысить точность измерения можно сузив ширину линии лазерного излучения накачки для сужения ширины контура усиления, что позволит увеличить крутизну склона АЧХ контура и крутизну ФСА. Однако обратным эффектом такого решения будет большее число шагов при перестройке лазера для сканирования рабочего диапазона частот и увеличение времени этого сканирования.

В результате этого может быть предложено сканирование не лазера накачки, а сигнального лазера, несущего после модуляции информацию о неизвестном СВЧ-сигнале с последующим определением его частоты. Кроме того, можно использовать сплитирование неизвестного сигнала по частоте с формированием из него СПДЧ [42], по биению составляющих которого можно определять неизвестную частоту также без сканирования лазера накачки. При этом может быть использован и узкополосный фотоприемник.

3.3 Обсуждение результатов

Результаты сравнительного анализа разработок ИМЧ на основе КУВРМБ и достигнутых в них характеристик приведены в табл. 3.

По сравнению с аналогичными методами на основе амплитудно-частотной дискриминации, методы на основе КУВРМБ показывают одни из наилучших показателей по точности измерения, а их рабочий диапазон частот определяется рабочим диапазоном частот перестройки лазера накачки, полосой частот используемого электрооптического модулятора, полосой пропускания фотодетектора и быстродействием АЦП, приводящим оцифровку принятого с фотодетектора сигнала.

Таблица 3. Характеристики методов ИМЧ на основе КУВРМБ

Ссылка	Технология	Диапазон, ГГц	Погрешность измерения, ГГц
[4]	Однополосная модуляция	0.5-28	± 0.02
[49]	Двухполосная модуляция с подавленной несущей	9-38	± 0.001
[51]	Однополосная модуляция с подавленной несущей	40	± 0.001
[53]	Двухполосная модуляция с подавленной несущей	0.47-23	± 0.008
[54]	Двухполосная модуляция с подавленной несущей	1-9	± 0.03

Как утверждается в [49] работа ИМЧ на основе КУВРМБ на чипе показывает 75-кратное увеличение производительности по сравнению с ранее предложенными системами. Дальнейшее улучшение может быть достигнуто путем применения гибридной интеграции электронной и фотонной части на едином чипе минимизируя потери для повышения соотношения сигнал/шум и увеличения динамического диапазона и улучшении общей стабильности рабочих режимов элементов на чипе. Возможность изменения ширины полосы пропускания КУВРМБ позволяет проводить перестройку согласно требуемой точности, разрешающей способности и ширины поддиапазонов при пошаговом сканировании. В отличие от иных решений на основе одного амплитудно-частотного дискриминатора, точность и разрешающая способность которых определяется шириной полосы частот дискриминатора, точность систем на основе КУВРМБ будет определяться крутизной склона АЧХ контура.

Недостатком подобной реализации является необходимость сканирования всего измеряемого диапазона, а время перестройки лазера накачки должно быть меньше времени жизни фонона в материале (~20 нс) [15].

Заключение

В рамках данной статьи проведен обзор существующих и перспективных методов и средств создания радиофотонных систем ИМЧ СВЧ-сигналов на основе сверхузкополосных частотных дискриминаторов резонансного и усилительного типа, а именно ИКР, резонаторов Фано, КУВРМБ.

Лучшие реализации ИМЧ СВЧ-сигналов для каждого из рассмотренных методов и их метрологические характеристики, такие как диапазон рабочих частот и точность измерений, сведены в табл. 4.

Таблица 4. Метрологические характеристики ИМЧ СВЧ-сигналов на основе сверхузкополосных частотных дискриминаторов (лучшие результаты)

Ссылка	Метод ИМЧ	Технология модуляции	Диапазон, ГГц	Погрешность измерения, ГГц
[31, 32]	ИКР	Двухполосная модуляция с подавленной несущей	2-34	± 0.0185
[41]	Фано	Однополосная модуляция с подавленной несущей	15	± 0.005
[49]	ВРМБ	Двухполосная модуляция с подавленной несущей	9-38	± 0.001

Методы ИМЧ на основе ИКР превышают требования по точности, а диапазон измеряемых частот может быть расширен за счет оптимизации полосы пропускания кремниевого модулятора (потенциально >50 ГГц). Требуемая точность измерений может быть обеспечена применением методов стабилизации условий эксплуатации и температурной стабилизацией компонентной базы.

Метод ИМЧ на основе резонатора Фано позволяет задавать полностью контролируемые и перестраиваемые параметры как узкополосного, так и широкополосного резонанса, при этом АЧХ такого резонанса будет зависеть от параметров интерферирующих сигналов. При таком способе реализации системе ИМЧ предъявляются жесткие требования к режимам работы источников интерферирующих сигналов, так как изменение параметров сигнала приводит к изменению ширины полосы или формы резонансной частотной характеристики.

Методы ИМЧ на основе КУВРМБ показали значительное превосходство в точности измерений по сравнению с другими методами, благодаря сверхузкополосному характеру контуров усиления ВРМБ, и обеспечили требуемый частотный диапазон, который определяется частотой настройки диапазона лазера накачки и частотным диапазоном модулятора. Принцип реализации ИМЧ на основе КУВРМБ, однако, будет заключаться в том, что время сканирования приемника будет определяться временем перестройки лазера накачки.

Данный обзор позволяет выделить следующие области применимости и направления дальнейшего развития:

1) Обзор работ по каждому виду дискриминаторов резонансного типа позволил проанализировать принципы их работы, основные причины погрешностей измерений и

пути минимизации и/или устранения этих погрешностей. На основе анализа была составлена сравнительная таблица характеристик, таких как частотный диапазон и точность измерений, и обсуждены дальнейшие перспективы их развития. Это позволяет разработчику выбирать пути решения конкретных задач при разработке системы ИМЧ СВЧ-сигналов.

2) Анализ показывает возможности и перспективы более широкого применения интегральных технологий. Это подтверждается материалами, представленными в данном обзоре, и определяется большим количеством публикаций последних лет, посвященных интегрированным реализациям фотонных систем [55–62].

3) Обзор существующих работ по системам ИМЧ СВЧ-сигналов показывает, что они также охватывают вопросы измерения мгновенной частоты нескольких СВЧ-сигналов одновременно [4, 49, 54, 63–65], ЛЧМ сигналов [66–68], импульсных сигналов [69, 70] и других специальных типов сигналов [67, 68, 70], в которых используются частотные и амплитудные дискриминаторы резонансного типа. Такие вопросы являются одними из наиболее важных направлений исследований по созданию полнофункционального фотонного радара.

4) Дальнейшее развитие рассмотренных методов позволит комплексно решить задачи проектирования и разработки полностью фотонной РЛС, которая вместе с оценкой угла прихода [71–73], измерением доплеровского сдвига частоты [74, 75] и конструкций оптических фильтров [76–79] на основе рассмотренных методов и средств позволили бы создать прототип многофункционального блока обработки информации для устройства ИМЧ на однокомпонентной базе.

5) Основными рекомендациями авторов для развития данных систем ИМЧ СВЧ-сигналов является применение для них принципов, основанных на теории СПДЧ, что позволит:

- снизить требования по полосе пропускания фотоприемников до 1-2 ГГц;
- формировать широкополосные ПДЧ (гребенки) на базе принципов СПДЧ;
- реализовать преимущество гребенок для анализа как узкополосных частотных дискриминаторов, так и широкополосных на основе волоконных брэгговских решеток;
- заменить широкополосные и сверхузкополосные частотные дискриминаторы не только широкополосными гребенками с равномерной, треугольной, спадающей амплитудой, но и гребенками, повторяющими контуры сверхузкополосных частотных дискриминаторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ по программе Приоритет-2030.

Список литературы

1. East, P.W. Fifty years of instantaneous frequency measurement / P.W. East // IET Radar Sonar Navig. – 2012. – V. 6. – I. 2. – P. 112–122.
2. Tsui, J.B.Y. Microwave receivers with electronic warfare applications / J.B.Y. Tsui. – New York : Artech House, 1993. – 480 p.
3. Pan, S.; Yao, J. Photonics-Based Broadband Microwave Measurement / S. Pan, J. Yao // J. Light. Technol. – 2016. – V. 35. – P. 3498–3513.
4. Long, X. Broadband instantaneous frequency measurement based on stimulated Brillouin scattering / X. Long, W. Zou, J. Chen // Opt. Express. – 2017. – V. 25. – P. 2206–2214.
5. Nguyen, L.V.T. Photonic technique for radio frequency measurement / L.V.T. Nguyen, D.B. Hunter, D.J. Borg // 2005 International Topical Meeting on Microwave Photonics. – 2005. – P. 197–200.

6. Attygalle, M. Improved Photonic Technique for Broadband Radio-Frequency Measurement / M. Attygalle, D.B. Hunter // *IEEE Photon Technol. Lett.* – 2008. – V. 21. – P. 206–208.
7. Zou, X. Instantaneous Microwave Frequency Measurement With Improved Measurement Range and Resolution Based on Simultaneous Phase Modulation and Intensity Modulation / X. Zou, S. Pan, J. Yao // *J. Light. Technol.* – 2009. – V. 27. – P. 5314–5320.
8. Li, W. Reconfigurable instantaneous frequency measurement system based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator / W. Li, N. H. Zhu, L.X. Wang // *Journal of photonics.* – 2012. – V. 4. – N. 2. – P. 427–436.
9. Liu, L. Instantaneous Microwave Frequency Measurement Based on Two Cascaded Photonic Crystal Nanocavities / L. Liu, W. Xue // *IEEE Photon J.* – 2020. – V. 12. – P. 1–9.
10. Li, Y. Instantaneous microwave frequency measurement with improved resolution / Y. Li, L. Pei, J. Li, J. Zheng [et al.] // *Opt. Commun.* – 2015. – V. 354. – P. 140–147.
11. Morozov, O.G. Instantaneous frequency measurement using double-frequency probing / O.G. Morozov, A.A. Talipov, M.R. Nurgazizov, T.S. Sadeev [et al.] // *Proc. of SPIE.* – 2013. – V. 8787. – P. 878708.
12. Zou, X. Photonics for microwave measurements / X. Zou, B. Lu, W. Pan, L. Yan, L. [et al.] // *Laser Photon Rev.* – 2016. – V. 10. – P. 711–734.
13. Vostrikov, E.V. Application of microwave photonics in fiber optical sensors / E.V. Vostrikov, E.V. Litvinov, S.A. Volkovskii, A.S. Aleinik [et al.] // *Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.* – 2020. – V. 20. – P. 1–23. (In Russian).
14. Bui, L.A. Recent advances in microwave photonics instantaneous frequency measurements / L.A. Bui // *Prog. Quantum Electron.* – 2020. – V. 69. – P. 100237.
15. Zhou, J. Instantaneous microwave frequency measurement using photonic techniques / J. Zhou, S. Aditya, K.E.K. Lee, P.P. Shum // *Proc. of the 10th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN 2011).* – 2011. – P. 1–2.
16. Chi, H. An approach to the measurement of microwave frequency based on optical power monitoring / H. Chi, X. Zou, J. Yao // *IEEE Photon Technol. Lett.* – 2008. – V. 20. – P. 1249–1251.
17. Zou, X.H. Microwave frequency measurement based on optical power monitoring using a complementary optical filter pair / X.H. Zou, H. Chi, and J.P. Yao // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* – 2009. – V. 57. – N. 2. – P. 505–511.
18. Lu, B. Photonic frequency measurement and signal separation for pulsed/CW microwave signals / B. Lu, W. Pan, X. Zou, X. [et al.] // *IEEE Photon Technol. Lett.* – 2013. – V. 25. – P. 500–503.
19. Fu, S., Photonic instantaneous frequency measurement using optical carrier suppression based DC power monitoring / S. Fu, M. Tang, P. Shum // *Proceedings of the IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting.* – 2011. – P. 85–86.
20. Drummond, M. Photonic RF instantaneous frequency measurement system by means of a polarization-domain interferometer / M. Drummond, P. Monteiro, R. Nogueira // *Opt. Express.* – 2010. – V. 17. – I. 7. – P. 5433–5438.
21. Zou, X. Photonic instantaneous frequency measurement using a single laser source and two quadrature optical filters / X. Zou, W. Pan, B. Luo, L. Yan // *IEEE Photon Technol. Lett.* – 2010. – V. 23. – P. 39–41.
22. Ghelfi, P. A fully photonics-based coherent radar system / P. Ghelfi, F. Laghezza, F. Scotti, [et al.] // *Nature.* – 2014. – V. 507. – P. 341–345.
23. Donzella, V. Design and fabrication of SOI micro-ring resonators based on sub-wavelength grating waveguides / V. Donzella, A. Sherwali, J. Flueckiger, S.M. Grist [et al.] // *Opt. Express.* – 2015. – V. 23. – P. 4791–4803.

24. Cheng, X. Fabrication of a high-Q factor ring resonator using LSCVD deposited Si₃N₄ film / X. Cheng, J. Hong, A.M. Spring, S. Yokoyama // *Opt. Mater. Express.* – 2017. – V. 7. – P. 2182–2187.
25. Wang, Z. Resonance control of a silicon microring resonator modulator under high-speed operation using the intrinsic defect-mediated photocurrent / Z. Wang, D. Paez, A.I.A. El-Rahman [et al.] // *Opt. Express.* – 2017. – V. 25. – P. 24827–24836.
26. Fegadolli, W.S. Reconfigurable silicon thermo-optical device based on spectral tuning of ring resonators / W.S. Fegadolli, V.R. Almeida, J.E.B. Oliveira // *Opt. Express.* – 2011. – V. 19. – P. 12727–12739.
27. Yariv, A. Critical coupling and its control in optical waveguide-ring resonator systems / A. Yariv // *IEEE Photon Technol. Lett.* – 2002. – V. 14. – P. 483–485.
28. Geuzebroek, D.H. Ring-Resonator-Based Wavelength Filters / D.H. Geuzebroek, A. Driessen // *Wavelength Filters in Fibre Optics*; Venghaus, H., Ed.; Springer Series in Optical Sciences. Springer. – 2006. – Volume 123. – P. 341–379.
29. Jiang, J. Photonic-assisted microwave frequency measurement system based on a silicon ORR / J. Jiang, H. Shao, X. Li [et al.] // *Opt. Commun.* – 2017. – V. 382. – P. 366–370.
30. Niu, J. Instantaneous microwave frequency measurement using a microfiber ring resonator (MRR) based photonic differentiator / S. Fu, K. Xu, X. Sun [et al.] // *Proceedings of the 2011 International Topical Meeting on Microwave Photonics jointly held with the 2011 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, 2011.* – 2011. – P. 226–229.
31. Tao, Y. Fully on-Chip Microwave Photonics System / Y. Tao, F. Yang, Z. Tao, [et al.] // *Applied Physics* – 2022. Available online: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2202/2202.11495.pdf>
32. Zhang, J. Approach for microwave frequency measurement based on a single photonic chip combined with a phase modulator and microring resonator / J. Zhang, C. Zhu, C., X. Yang [et al.] // *Curr. Opt. Photon.* – 2018. – V. 2. – P. 576–581.
33. Marpaung, D. On-chip photonic-assisted instantaneous microwave frequency measurement system / D. Marpaung // *IEEE Photon Technol. Lett.* – 2013. – V. 25. – P. 837–840.
34. Billah, M.R. Hybrid integration of silicon photonics circuits and InP lasers by photonic wire bonding / M.R. Billah, M. Blaicher, T. Hoose, P.-I. Dietrich [et al.] // *Optica.* – 2018. – V. 5. – P. 876–883.
35. Xiang, C. Laser soliton microcombs heterogeneously integrated on silicon / C. Xiang, J. Liu, J. Guo, L. Chang [et al.] // *Science.* – 2021. – V. 373. – P. 99–103.
36. Thomson, D. Roadmap on silicon photonics / D. Thomson, A. Zilkie, J.E. Bowers, T. Komljenovic [et al.] // *J. Opt.* – 2016. – V. 18. – P. 073003.
37. Zhou, W. Progress in 2D photonic crystal Fano resonance photonics / W. Zhou, D. Zhao, Y.-C. Shuai [et al.] // *Prog. Quantum Electron.* – 2014. – V. 38. – P. 1–74.
38. Limonov, M.F. Fano resonances in photonics / M.F. Limonov, M. Rybin, A. Poddubny, Y.S. Kivshar // *Nat. Photon.* – 2017. – V. 11. – P. 543–554.
39. Yu, Y. Fano resonance control in a photonic crystal structure and its application to ultrafast switching / Y. Yu, M. Heuck, H. Hu [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2014. – V. 105. – I. 6. – P. 061117.
40. Limonov, M.F. Fano resonance for applications / M.F. Limonov // *Adv. Opt. Photon.* – 2021. – V. 13. – P. 703–771.
41. Zhu, B. High-sensitivity instantaneous microwave frequency measurement based on a silicon photonic integrated Fano resonator / B. Zhu, W. Zhang, S. Pan, J. Yao // *J. Light. Technol.* – 2018. – V. 37. – P. 2527–2533.
42. Кузнецов, А.А. Методы и средства радиофотонного векторного анализа на основе сверхзкополосного пакета дискретных частот как нового типа зондирующего

- излучения / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Казань, КНИТУ–КАИ, 2021. – 304 с.
43. Zeng, X. Stimulated Brillouin scattering in chiral photonic crystal fiber / X. Zeng, W. He, M.H. Frosz [et al.] // *Photon Res.* – 2022. – V. 10. – P. 711–718.
 44. Gyger, F. Observation of Stimulated Brillouin Scattering in Silicon Nitride Integrated Waveguides / F. Gyger, J. Liu, F. Yang, [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2020. – V. 124. – P. 013902.
 45. Merklein, M. Stimulated Brillouin Scattering in Photonic Integrated Circuits: Novel Applications and Devices / M. Merklein, A. Casas-Bedoya, D. Marpaung, [et al.] // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2016. – V. 22. – P. 336–346.
 46. Reintjes, J.F. Nonlinear Optical Processes // *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 3rd ed.; Robert, A., Meyers, R.A., Eds.; Academic Press.: – 2003. – P. 537–581.
 47. Bashkansky, M. Reintjes, J. SCATTERING | Stimulated Scattering // *Encyclopedia of Modern Optics*; Robert, D., Guenther, R.D., Eds.; Elsevier. – 2005. – P. 330–340.
 48. Kobayakov, A. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers / A. Kobayakov, M. Sauer, D. Chowdhury, D. // *Adv. Opt. Photon.* – 2010. – V. 2. – P. 1–59.
 49. Jiang, H. Wide-range, high-precision multiple microwave frequency measurement using a chip-based photonic Brillouin filter / H. Jiang, D. Marpaung, M. Pagani [et al.] // *Optica.* – 2016. – V. 3. – P. 30–34.
 50. Ma, D. Time–frequency analysis of microwave signals based on stimulated Brillouin scattering / D. Ma, P. Zuo, Y. Chen // *Opt. Commun.* – 2022. – V. 516. – P. 128228.
 51. Li, J. A scheme of instantaneous frequency measurement with high precision assisted by photonics / J. Li, P. Xu, K. Song, [et al.] // *Int. J. Opt. Photonic Eng.* – 2021. – V. 6:038.
 52. Debut, A. Linewidth narrowing in Brillouin lasers: Theoretical analysis / A. Debut, S. Randoux, J. Zemmouri, J. // *Phys. Rev. A.* – 2000. – V. 62. – P. 023803.
 53. Wang, D. Instantaneous microwave frequency measurement with high-resolution based on stimulated Brillouin scattering / D. Wang, L. Pan, L.; Y. Wang [et al.] // *Opt. Laser Technol.* – 2018. – V. 113. – P. 171–176.
 54. Zheng, S. High-Resolution Multiple Microwave Frequency Measurement Based on Stimulated Brillouin Scattering / S. Zheng, S. Ge, X. Zhang [et al.] // *IEEE Photonics Technol. Lett.* – 2012. – V. 24. – P. 1115–1117.
 55. Zhang, W. Optically tunable Fano resonance in a grating-based Fabry–Perot cavity-coupled microring resonator on a silicon chip / W. Zhang, W. Li, J. Yao, J. // *Opt. Lett.* – 2016. – V. 41. – P. 2474–2477.
 56. Li, Y. Photonic instantaneous frequency measurement of wideband microwave signals / Y. Li, L. Pei, J. Li, Y. Wang, J. Yuan, T. Ning // *PLoS One.* – 2017. – V. 12. – I. 8. – P. e0182231.
 57. Sima, C. Integrated reconfigurable photonic filters based on interferometric fractional Hilbert transforms / C. Sima, B. Cai, B. Liu, Y. Gao [et al.] // *Appl. Opt.* – 2017. – V. 56. – P. 7978–7984.
 58. Hunter, D.B. Wideband microwave photonic channelized receiver / D.B. Hunter, L.G. Edvell, and M.A. Englund // *Proc. Int. Top. Meeting Microw. Photon., 2005 (MWP 2005).* – 2005. – P. 249–252.
 59. Guo, H. Measurement of microwave frequency using a monolithically integrated scannable echelle diffractive grating / H. Guo, G. Xiao, N. Mrad, J. Yao // *IEEE Photon. Tech. Lett.* – 2009. – V. 34. – P. 45–47.
 60. Fandiño, J.S. Photonics-based microwave frequency measurement using a double-sideband suppressed-carrier modulation and an InP integrated ring-assisted Mach–Zehnder interferometer filter / J.S. Fandiño, P. Muñoz, P. // *Opt. Lett.* – 2013. – V. 38. – P. 4316–4319.
 61. Marpaung, D. Integrated microwave photonics / D. Marpaung, J. Yao, J. Capmany // *Nat. Photonics.* – 2019. – V. 13. – P. 80–90.

62. Zhang, W. Silicon-Based Integrated Microwave Photonics / W. Zhang, J. Yao // *IEEE J. Quantum Electron.* – 2015. – V. 52. – P. 1–12.
63. Ming, L. Advanced design of a complex fiber Bragg grating for a multichannel asymmetrical triangular filter / L. Ming, H. Junya, L. Hongpu // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2009. – V. 26. – P. 228–234.
64. Sakhabutdinov, A.J. Multiple frequencies analysis in FBG based instantaneous frequency measurements / A.J. Sakhabutdinov, O.G.Morozov, A.A. Ivanov, R.S. Misbakhov // *Proc. of the 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications.* – 2018. – P. 1–5.
65. Shen, Z. Photonics-assisted non-scanning high-accuracy frequency measurement using low-speed components / Z. Shen, C. Jin, Q. He [et al.] // *IEEE Photonics Journal.* – 2019. – V. 11. – N. 4. – P. 1–8.
66. Zhang, B. Photonics-Based Instantaneous Multi-Parameter Measurement of a Linear Frequency Modulation Microwave Signal / B. Zhang, X. Wang, S. Pan // *J. Light. Technol.* – 2018. – V. 36. – P. 2589–2596.
67. Wang, X. Power-Independent Microwave Instantaneous Frequency Measurement Based on Combination of Brillouin Gain and Loss Spectra / X. Wang, Y.-L. Yang, Y.-Q. Xu, Y. Cao [et al.] // *IEEE Photon J.* – 2022. – V. 14. – P. 1–7.
68. Lu, B. Photonic-Assisted Intrapulse Parameters Measurement of Complex Microwave Signals / B. Lu, W. Pan, X. Zou, H. Jiang [et al.] // *J. Light. Technol.* – 2018. – V. 36. – P. 3633–3644.
69. Fu, S. Instantaneous Microwave Frequency Measurement Using Programmable Differential Group Delay (DGD) Modules. / S. Fu, J. Zhou, P.P. Shum, K. Lee // *IEEE Photon J.* – 2010. – V. 2. – P. 967–973.
70. Yao, Y. Fully integrated multipurpose microwave frequency identification system on a single chip / Y. Yao, Y. Zhao, Y. Wei, F. Zhou [et al.] // *Conf. Lasers Electro-Opt. Tech. Dig. Ser.* – 2022. – P. SM3N.5.
71. Morozov, O.G. Radiophotonic Method for Angle of Arrival Estimation of a Reflected Radar Signal Based on Tandem Amplitude-Phase Modulation / O.G. Morozov, E.P. Denisenko, P.E. Denisenko, A.A. Lustina [et al.] // *Proc. of the 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications.* – 2022. – P. 1–5.
72. Lin, T. Photonic 2-D angle-of-arrival estimation based on an L-shaped antenna array for an early radar warning receiver / T. Lin, Z. Zhang, Y. Wang, Z. Zhu [et al.] // *Opt. Express.* – 2020. – V. 28. – P. 38960–38972.
73. Tu, Z. Angle-of-Arrival Estimation of Broadband Microwave Signals Based on Microwave Photonic Filtering / Z. Tu, A. Wen, Z. Xiu, W. Zhang [et al.] // *IEEE Photonics J.* – 2017. – V. 9. – P. 1–8.
74. Morozov, O.G. Radiophotonic module for Doppler frequency shift measurement of a reflected signal for radar type problems solving / O.G. Morozov, A.A. Ivanov, A.Z. Sakhabutdinov, P.E. Denisenko [et al.] // *Proc. SPIE.* – 2022. – V. 12295. – P. 122950A.
75. Zhuo, H. Photonic Doppler frequency shift measurement without ambiguity based on cascade modulation / H. Zhuo, A. Wen, Z. Tu // *Opt. Commun.* – 2020. – V. 470. – P. 125798.
76. Fallahi, V. Design of a High-Quality Optical Filter Based on 2D Photonic Crystal Ring Resonator for WDM Systems / V. Fallahi, M. Seifouri, M. // *J. Opt. Commun.* – 2018. – V. 41. – P. 355–361.
77. Arianfard, H. Advanced Multi-Functional Integrated Photonic Filters Based on Coupled Sagnac Loop Reflectors / H. Arianfard, J. Wu, S. Juodkazis, D.J. Moss // *J. Light. Technol.* – 2021. – V. 39. – P. 1400–1408.
78. Foroughifar, A. Design and analysis of a novel four-channel optical filter using ring resonators and line defects in photonic crystal microstructure / A. Foroughifar, H. Saghaei, E. Veisi // *Opt. Quantum Electron.* – 2021. – V. 53. – P. 101.

79. Daulay, O. On-chip programmable microwave photonic filter with an integrated optical carrier processor / O. Daulay, R. Botter, D. Marpaung // OSA Contin. – 2020. – V. 3. – P. 2166.

**PHOTONIC SYSTEMS FOR INSTANTANEOUS
FREQUENCY MEASURING OF MICROWAVE SIGNALS
BASED ON ULTRA-NARROW-BAND FREQUENCY
DISCRIMINATORS – RESONATORS AND AMPLIFIERS.
A REVIEW**

A.V. Maltsev, A.A. Ivanov

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

Annotation. The development of photonic and microwave technologies and the accompanying element base has led to significant progress in the issues of methods and means for measuring the instantaneous frequency (IMF) of microwave signals based on microwave photonics, which was previously carried out on the basis of classical electronics and its element base. Electronic microwave IMFs are currently widely used in both military and civilian applications, such as electronic warfare systems, electromagnetic environment assessment for radio electronic compatibility, etc. However, their use is limited to channel solutions with a frequency range of 2 GHz due to limitations of electronic circuits. Photonic systems have made it possible to significantly expand the range of measured frequencies, accuracy, and resolution of photonic receivers in a single channel to at least 10-40 GHz. For example, the use of microwave IMFs based on stimulated Mandelstam-Brillouin scattering with amplification allows measurements in the range from 0.5 to 28 GHz with a resolution of 20 MHz. Similar or better characteristics can be obtained using integrated ring resonators and Fano resonators. In this case, the work on the creation of methods and means of IMF based on frequency discriminators of the resonance type was based on measuring the optical power of the carrier laser signal modulated by the microwave signal. This article provides an overview of approaches that use ultra-narrowband frequency discriminators based on the specified resonators and amplifiers. The principles of their operation, as well as the associated advantages, disadvantages and existing solutions to the identified problems are considered in detail.

Key words: microwave photonics; instantaneous frequency measurement; ultra-narrowband frequency discriminator; integrated ring resonator; integrated Fano resonator; amplifier based on stimulated Mandelstam-Brillouin scattering.

Статья представлена в редакцию 2 сентября 2024г.