

ДВУХЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ РАДИОСИГНАЛОВ СВЧ-ДИАПАЗОНА С ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ

Нургазизов М.Р.¹

¹ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», Казань, Россия (420111, Казань, ул. Карла Маркса, 10), e-mail: marat_nur@bk.ru

В работе представлен фотонный метод измерения мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона, основанный на формировании в амплитудном модуляторе Маха-Цендера двухчастотного лазерного излучения с подавленной несущей и разностной частотой, равной измеряемой, с дальнейшим его преобразованием «частота-амплитуда» в волоконной решетке Брэгга с фазовым π -сдвигом. С целью снижения температурной зависимости погрешности измерений организован контур мониторинга температуры элементов системы (лазера, модулятора и решетки), основанный на оценке изменения параметров огибающей двухчастотного зондирующего окна прозрачности решетки Брэгга излучения, на специально выделенной разностной частоте. Определение отклонения параметров элементов системы от идеальных достигается тем, что измеряется коэффициент модуляции огибающей биений сигналов пары, прошедшей через окно прозрачности решетки Брэгга, и определяется знак разности между фазами огибающей биений сигналов сгенерированной пары, не прошедшей через окно, и огибающей биений сигналов пары, прошедшей через него. По первому параметру определяется величина ухода контура, по второму – направление. При идеальной настройке первый параметр равен единице, а второй – нулю.

Ключевые слова: измерение мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона, волоконная решетка Брэгга, двухчастотное излучение, контур мониторинга температуры.

TWO-FREQUENCY SYSTEM FOR MICROWAVE SIGNAL INSTANTANEOUS FREQUENCY MEASURING WITH TEMPERATURE STABILIZATION

Nurgazizov M.R.¹

¹Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia (420111, Kazan, Karl Marx street, 10), e-mail: marat_nur@bk.ru

This paper presents a photonic technique for instantaneous frequency measuring of microwave radio signals based on the formation of two-frequency laser radiation in Mach-Zehnder amplitude modulator with suppressed carrier and different frequency equal to the measuring, and its sequent "frequency-amplitude" transformation in the fiber Bragg grating with phase π -shift. In order to reduce the temperature dependence of the measurement error the monitoring contour of system elements (laser, modulator, grating) temperature was organized based on the evaluation of envelope parameters modifying of the two-frequency radiation, probing the transparent window of Bragg grating on a special distinguished different frequency. Defining of the system elements parameters deviations from the ideal is achieved by the measuring of beating envelope modulation index of signal pair passed through the transparency window of Bragg grating, and by the determination of sign of the difference between the phases of the beating envelope of generated signal pair that do not pass through the window and the beating envelope of signal pair held there through. The value of deviation is determined by the first parameter, its direction – by the second. In an ideal setting the first parameter is equal to unity, and the second – to zero.

Keywords: instantaneous frequency measuring of microwave radio signals, fiber Bragg grating, two-frequency radiation, temperature monitoring contour

Определение характеристик радиочастотных сигналов СВЧ-диапазона играет важную роль в области современных радиолокационных и телекоммуникационных технологий (радары, системы опознавания, когнитивное радио, широкополосные системы связи и т.д.). Одним из наиболее значимых параметров для измерения является мгновенная частота. Современные радиотехнические методы измерений мгновенной частоты характеризуются низкой помехоустойчивостью, принципиальной возможностью работы лишь в узкой полосе частот с многоканальным спектральным расширением, громоздкостью устройств их

технической реализации. Фотонные методы измерения мгновенной частоты, основанные на процедурах ее измерительного преобразования в оптическом диапазоне и включающие, как правило, процессы модуляции, дисперсионного различения с преобразованием «частота – амплитуда» и фотодетектирования, являются наиболее перспективными, так как имеют существенные преимущества перед радиотехническими – широкая полоса измеряемых частот, низкие потери и невосприимчивость к электромагнитным помехам, малый вес, объем, возможность работы в широком диапазоне климатических условий.

На современном этапе развития фотонных методов можно выделить ряд основных, классифицируемых по реализуемым для построения систем измерений целевым функциям: частотно-зависимой мощности, микроволновой фотонной и узкополосной оптической фильтрации, многоканального спектрального мультиплексирования и оптического смещения, цифрового кодирования и преобразования Гильберта. В большинстве из перечисленных методов в качестве устройства, осуществляющего модуляцию оптической несущей сигнал омрадиочастоты, используется модулятор Маха-Цендера (ММЦ). Одним из основных устройств дисперсионного различения мгновенной частоты являются волоконные решетки Брэгга (ВРБ).

Применение известных фотонных методов измерения мгновенной частоты не всегда позволяет добиться решения поставленных перед исследователем задач. В рассмотренных методах зачастую присутствует погрешность измерений, вызванная нестабильностью частоты и амплитуды источника оптического излучения. Другой проблемой является погрешность измерений мгновенной частоты, вызванная температурной зависимостью спектральных характеристик ММЦ и ВРБ. Так отмечается погрешность измерений ± 0.25 ГГц, определяемая температурными флуктуациями как несущей лазерного излучения, так и рабочей точки ММЦ. Также стоит отметить, что во многих проанализированных методах отсутствует конкретная методика по измерению амплитуды радиочастотного сигнала, в котором может быть заложена информация, например, о характеристиках канала связи или дальности до объекта локационного наблюдения. В результате возникает необходимость, как в разработке новых методов измерений, позволяющих решить данные вопросы, так и в усовершенствовании традиционных. В [6] был предложен и кратко рассмотрен фотонный метод измерения мгновенной частоты СВЧ-сигнала, основанный на формировании в ММЦ двухчастотного лазерного излучения с разностной частотой, равной измеряемой, и его преобразовании типа «частота – амплитуда» в ВРБ. Формирование двухчастотного лазерного излучения осуществлялось в ММЦ на основе метода Ильина-Морозова [2–4]. Отмечены как ряд преимуществ разработанного метода, так и его недостатки, одним из вариантов устранения которых является использование ВРБ с фазовым π -сдвигом [5, 8]. В настоящей

статье рассматривается модернизация метода на основе введения в него операций мониторинга температуры элементов системы (лазера, модулятора, решетки Брэгга), для чего применяется двухчастотное зондирование окна прозрачности решетки излучением со специально выделенной разностной частотой, сформированным для универсальности также по методу Ильина-Морозова.

1. Двухчастотная система измерения мгновенной частоты СВЧ-сигналов

Структурная схема системы измерения мгновенной частоты СВЧ-сигнала показана на рис. 1. Система состоит из DFB-лазера ЛД, ММЦ, оптического разветвителя 1×2 и двух каналов: опорного и измерительного преобразования «частота – амплитуда». Опорный канал состоит из фотодетектора ФД2 и схемы частотной селекции СЧС2. Канал измерительного преобразования – из ВРБ, соединенной с оптическим разветвителем и фотодетектором ФД1 через циркулятор, и схемы частотной селекции СЧС1. Сигналы с выходов СЧС1 и СЧС2 поступают на контроллер определения параметров неизвестного СВЧ-сигнала.

Оптическая несущая ЛД поступает на ММЦ, где модулируется СВЧ-сигналом, а затем разделяется на два канала в оптическом разветвителе 1×2.

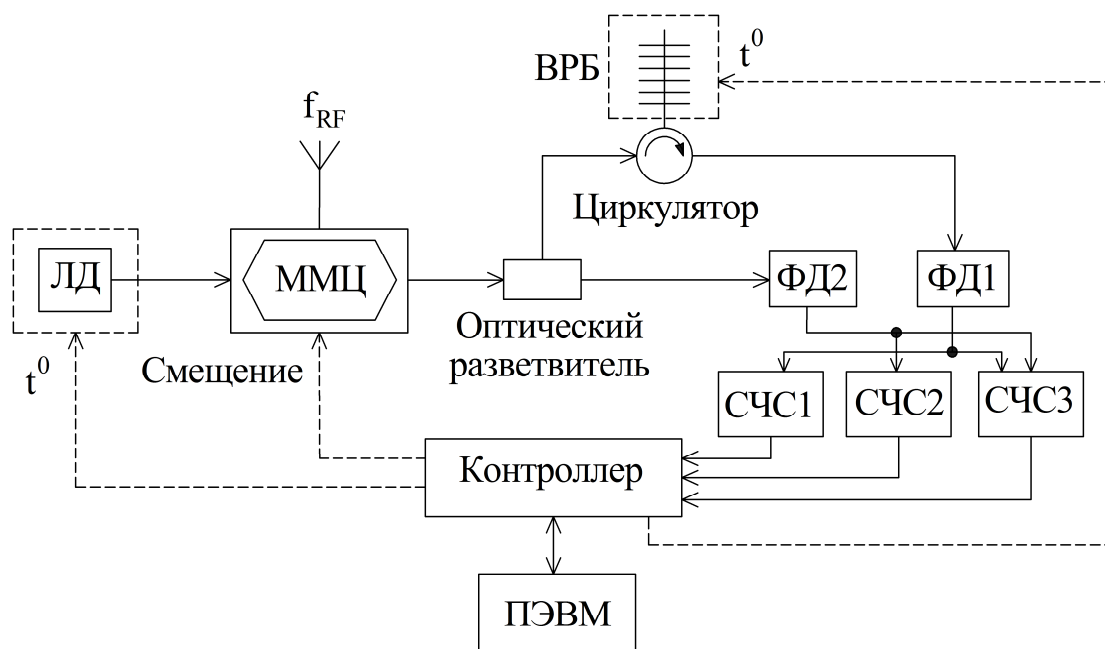


Рис. 1. Двухчастотная система измерения мгновенной частоты СВЧ-сигнала

По каналу измерительного преобразования излучение через вход циркулятора поступает на ВРБ, отражается от нее и с выхода циркулятора подается на первый фотодетектор ФД1. Второй канал с фотодетектором ФД2 используется как опорный. Схемы частотной селекции СЧС1 и СЧС2 содержат два полосовых фильтра: первый – под диапазона 0,3–3 ГГц, второй – 3–30 ГГц. Представленное деление условно по значению частот, зависит от

требуемых параметров измерения и определяется параметрами ВРБ с фазовым π -сдвигом, что будет объяснено ниже.

Находя в контроллере определения параметров неизвестного СВЧ-сигнала отношение амплитуд сигналов на выходе ФД1 и ФД2, прошедших через равномерные полосовые фильтры СЧС1 и СЧС2, получаем функцию отношения мощностей, которая однозначно зависит от частоты СВЧ-сигнала и не зависит от мощности излучения лазера и СВЧ-сигнала. Амплитуда неизвестного СВЧ-сигнала определяется по выходному сигналу ФД2, прошедшего СЧС2.

Диапазон измеряемых мгновенных частот в устройствах, аналогичных предложенному нами, составляет около $2/3$ от ширины полосы пропускания ВРБ на полувысоте. Измерение более высоких частот ограничено дисперсионными эффектами.

Для диапазона СВЧ-сигналов в диапазонах, используемых в телекоммуникационных и радиолокационных технологиях, нижняя измеряемая частота составляет 0,3 ГГц, верхняя – 30 ГГц. Данная информация позволила определить требования к ВРБ, используемой для измерения мгновенной частоты.

Ширина полосы пропускания ВРБ на полувысоте с учетом преобразования удвоенной измеряемой частоты $2\omega_{RF}$ должна составлять 45 ГГц (0,36 нм), что характерно для практически реализуемых решеток (0,1–0,5 нм). Заметим, что около центральной частоты классических ВРБ существует неиспользуемая зона ± 3 ГГц (0,025 нм), которая определяется малой крутизной и нелинейностью преобразования «частота-амплитуда».

Учитывая это, было предложено изменить конфигурацию измерительной ВРБ на решетку с фазовым π -сдвигом и использовать характерный для таких решеток провал в спектральной характеристики для организации первого поддиапазона канала измерительного преобразования 0,3–3 ГГц (рис. 2,а).

При этом верхняя граница диапазона может быть выбрана разработчиком в соответствии с требованиями решаемых задач. Второй поддиапазон соответственно определяется частотами 3–30 ГГц.

Верхняя граница будет соответствовать ширине полосы пропускания ВРБ в 60 ГГц на уровне, сравнимом с 0,1–0,2 от ее высоты. Полученные характеристики измерительного преобразования представлены на рис. 2,б.

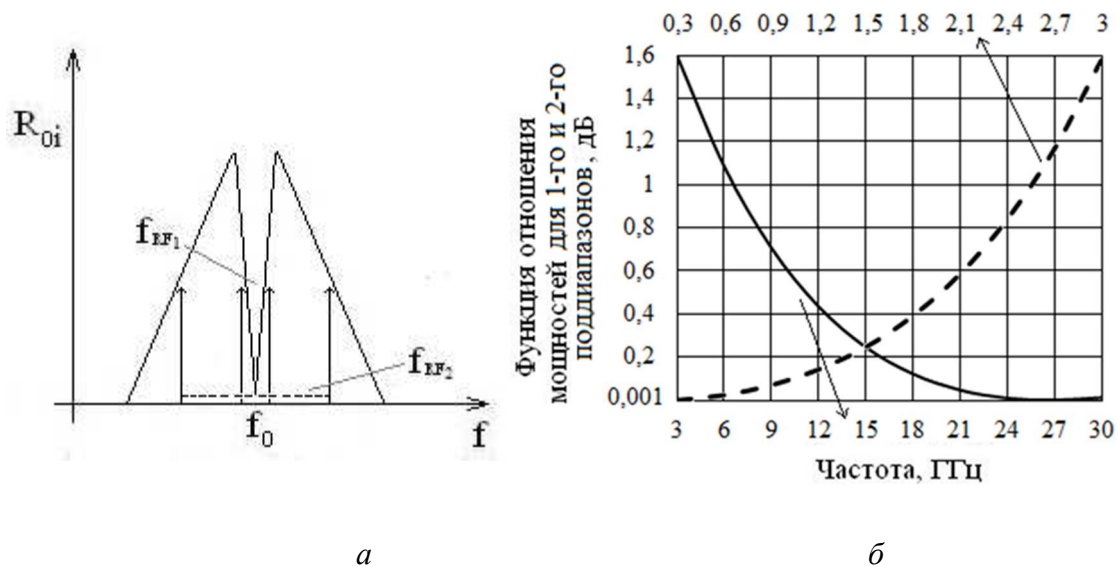


Рис. 2. ВРБ с треугольным равнобедренным спектром и внесенным фазовым π -сдвигом (а) и полученные измерительные характеристики (б)

2. Контур мониторинга температуры элементов системы

Для снижения погрешности измерений, вызванных температурными флуктуациями спектральных характеристик элементов системы, использовалось двухчастотное зондирование окна прозрачности ВРБ с фазовым π -сдвигом, что позволило организовать дополнительный канал мониторинга СЧСЗ (рис. 1). По существу окно прозрачности ВРБ представляет собой избирательный контур с известной лоренцевской характеристикой, которая вследствие оговоренных выше причин может быть сдвинута по частоте. Контроль отклонения параметров АЧХ контура может быть произведен следующим образом.

Способ заключается в том, что источник двухчастотного сигнала на базе ММЦ выдает пару сигналов одинаковой амплитуды со средней частотой, соответствующей центральной длине волны полосы пропускания контролируемой ВРБ и/или длине волны излучения лазера и настроенного для этих длин волн ММЦ с «нулевым» положением рабочей точки модуляционной характеристики. Разностная частота указанной пары достаточно узкая, для того чтобы оба сигнала попали в окно прозрачности ВРБ и не попали в диапазон измеряемых частот (меньше 300 МГц). Сгенерированная пара сигналов поступает на ВРБ и принимается первым приемником. На второй приемник поступает сгенерированная пара сигналов, не прошедшая через окно прозрачности решетки. В структуре СЧСЗ находятся два избирательных фильтра, настроенных на специальную разностную частоту и соединяющих два фотоприемника с контроллером.

Определение отклонения длин волн при изменении температуры элементов системы достигается тем, что измеряется коэффициент модуляции огибающей биений сигналов пары, прошедшей через окно прозрачности, и определяется знак разности между фазами огибающей биений сигналов сгенерированной пары, не прошедшей через окно прозрачности

и огибающей биения сигналов пары, прошедшей через него. По первому параметру определяется величина ухода контура, по второму – направление. При идеальной настройке первый параметр равен единице, а второй – нулю. Достижимая точность измерений по температуре составляет 0,1 °С, диапазон контроля 5–10 °С, что достаточно для обеспечения прецизионных условий работы контура мониторинга.

Ранее была показана необходимость контроля спектральных характеристик двухчастотного излучения с разностной частотой равной измеряемой, стабильность которых в большей степени определяется стабильностью положения рабочей точки на модуляционной характеристике ММЦ. В контуре мониторинга для этого можно использовать опорный канал. Излучение ЛД проходит через ММЦ, на который поступает напряжение постоянного смещения для фиксации «нулевой» точки модуляционной характеристики. Выходной сигнал является двухчастотным при идеальной настройке в «нулевую» точку. Третий избирательный фильтр СЧСЗ настроен на половину специальной разностной частоты. Изменение положения рабочей точки определяется характеристикой 0,2 В на 1 °С. При отклонении положения рабочей точки в спектре выходного излучения ММЦ появляется составляющая на несущей (ранее подавленной) частоте и появление сигнала на выходе третьего фильтра. При наличии сигнала на выходе этого фильтра с контроллера подается управляющий сигнал на источник постоянного смещения и положение рабочей точки подстраивается.

Заключение

Проблема обеспечения высоких метрологических характеристик систем измерения мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона ставит задачу исследования методов их достижения. Была показана как необходимость контроля спектральных характеристик двухчастотного излучателя на базе ММЦ, стабильность которых в большей степени определяется стабильностью положения рабочей точки на модуляционной характеристике, так и контроля симметричности двухчастотного излучения относительной длины волны излучения лазера и/или центральной длины волны решетки Брэгга при изменении температуры элементов системы. В противном случае при изменении температуры на 1°С погрешность измерения может составить около 120 МГц.

Двухчастотный метод контроля симметричности выбран из широкого спектра двух-, трех- и четырехчастотных методов, разработанных в НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, для зондирования решеток Брэгга и определения их параметров по критерию простоты технической реализации [1–4, 7–9]. Указанный метод контроля симметричности и предложенный метод контроля и стабилизации положения рабочей точки реализованы в канале фильтрации микроволновых сигналов контура мониторинга температуры элементов

системы (СЧСЗ), на специально выделенной разностной частоте, не входящей в диапазон измеряемых мгновенных частот.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой и проектной частей государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) по организации научных исследований, выполняемых ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» на кафедре телевидения и мультимедийных систем и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Фотоника», задание 3.1962.2014К).

Список литературы

1. Айбатов, Д.Л., Морозов О.Г., Садеев Т.С. Преобразование спектра оптического излучения в двухканальном модуляторе Маха-Цендера и ROF-фильтр на его основе // Нелинейный мир. — 2010. — Т. 8. — № 5. — С. 302-309.
2. Морозов, О.Г. Амплитудно-фазовое преобразование частоты в системах временной и частотной рефлектометрии волоконно-оптических информационных и измерительных сетей // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2004. — Т. 7. — № 1. — С. 63-71.
3. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Просвирин В.П. и др. Амплитудно-фазовые методы формирования зондирующих излучений для систем анализа волоконно-оптических структур // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2007. — Т. 10. — № 3. — С. 119-124.
4. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. Синтез двухчастотного излучения и его применение в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2010. — Т. 13. — № 3. — С. 84-91.
5. Морозов О.Г., Нургазизов М.Р., Талипов А.А. и др. Измерение мгновенной частоты СВЧ-радиосигналов в оптическом диапазоне на основе преобразования «частота-амплитуда» в волоконной решётке Брэгга с фазовым π -сдвигом // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. — 2013. — № 3 (19). — С. 30-41.
6. Морозов О.Г., Талипов А.А., Нургазизов М.Р. и др. Измерение мгновенной частоты с помощью двухчастотного зондирования // Научно-технический вестник Поволжья. — 2012. — № 4. — С. 146-149.
7. Морозов О.Г., Садеев Т.С. Спектральные характеристики фотонных фильтров микроволновых сигналов на основе амплитудных электрооптических модуляторов // Вестник

Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. — 2010. — № 3. — С. 22-30.

8. Морозов О.Г., Степущенко О.А., Садыков И.Р. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решёток Брэгга с фазовым сдвигом // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. — 2010. — № 3. — С. 3-13.

9. Талипов А.А., Морозов О.Г., Нургазизов М.Р. и др. Метод формирования двухчастотного излучения для синтеза солитонов и применения спектрально-эффективной модуляции RZ и CSRZ форматов в оптических сетях доступа // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. — 2012. — № 2 (16). — С. 3-12.

Рецензенты:

Морозов О.Г., д.т.н., профессор, директор научно-исследовательского института прикладной электродинамики, фотоники и живых систем ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань;

Морозов Г.А., д.т.н., профессор, директор Казанского филиала ФГОБУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Казань.