УДК 621.383

О.Г. Морозов^{1,2}, Г.А. Морозов^{1,2}, М.Р. Нургазизов¹, А.А. Талипов¹¹ Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева (КАИ), Казань, Россия² Поволжский государственный университет телекоммуникаций
и информатики, Казанский филиал, Казань, Россия

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ РАДИОСИГНАЛОВ С АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫМ МОДУЛЯЦИОННЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ НЕСУЩЕЙ

Рассмотрены вопросы разработки принципов построения оптико-электронных систем измерения мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона, основанных на применении в них оригинальных способов амплитудно-фазового модуляционного преобразования радиосигналом одночастотного лазерного излучения оптической несущей в симметричное двухчастотное и измерительного преобразования типа «частота – амплитуда» в волоконных решетках Брэгга специального профиля, с доказательством возможности расширения с их помощью диапазона измеряемых частот, повышения разрешающей способности измерений в области «низких» частот и чувствительности измерений в области «высоких» частот.

Ключевые слова: радиофотоника, измерение мгновенной частоты радиосигнала, амплитудно-фазовое модуляционное преобразование оптической несущей, измерительное преобразование «частота – амплитуда», волоконная решетка Брэгга.

O.G. Morozov^{1,2}, G.A. Morozov^{1,2}, M.R. Nurgazizov¹, A.A. Talipov¹¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KAI),
Kazan, Russian Federation² Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,
Kazan branch, Kazan, Russian Federation

OPTOELECTRONIC SYSTEMS FOR RADIOSIGNALS INSTANTANEOUS FREQUENCY MEASURING WITH AN AMPLITUDE-PHASE MODULATION CONVERSION OF OPTICAL CARRIER

This article describes how to develop design principles of optoelectronic systems for microwave-radio signals in instantaneous frequency measuring based on the use of them for original amplitude-phase modulation conversion of single-frequency optical carrier into symmetrical dual-frequency, subsequent "frequency – amplitude" measurement conversion in the fiber Bragg grating with special reflective

contour. The aim is to prove the possibility of measurement frequency range expanding, increasing of measurements resolution at the "low" frequencies range and sensitivity at the "high" frequencies one.

Keywords: radio photonics, radio signals instantaneous frequency measuring, amplitude-phase modulation conversion of optical carrier, "frequency – amplitude" measuring conversion, fiber Bragg grating.

1. Введение

С развитием радиофотоники оптико-электронные системы (ОЭС) измерения мгновенной частоты радиосигналов (ИМЧР) СВЧ-диапазона становятся одним из перспективных инструментов, применяемых в различных структурах оборонного (РЛС предупреждения, разведки наземных и бортовых средств, радиоэлектронной борьбы и т.д.) и гражданского (оценка электромагнитной обстановки, программно-определяемое радио, системы связи «радио-по-волокну» и т.д.) назначения, построенных на принципах комплексной обработки радиосигналов в оптическом диапазоне электромагнитных волн. В сравнении с классическими методами [1], которые используют радиоэлектронные многоканальные технологии, ОЭС ИМЧР имеют существенные преимущества по широкому частотному и амплитудному диапазону измерений, малым потерям, высокой электромагнитной помехоустойчивости, а также простоте структуры, компактности и малому весу [2].

Классические электронные технологии ИМЧР [1] подразумевают оценку скорости изменения фазы, как правило, одной, наибольшей по амплитуде, несущей радиосигнала (непрерывного или импульсного), принимаемой системой измерения за фиксированный период времени в многоканальном по набору частот устройстве, причем многоканальность последнего обусловлена узкополосностью его фазового дискриминатора.

Технологии ОЭС ИМЧР [2] включают в себя процессы: модуляционного преобразования радиосигналом оптической несущей; измерительного различения полученных спектральных составляющих с преобразованием типа «частота – время», «частота – пространство» или «частота – амплитуда»; оптико-электронного преобразования в фотодетекторе и вычисления однозначно зависящей от измеряемой частоты соответственно временной, пространственной или амплитудной функции сравнения (отношения) измеренного сигнала к некоторому опорному для устранения влияния нестабильности мощности лазера и сигнала.

Для модуляционного преобразования используются [3–5] модуляция по интенсивности или фазе в модуляторах Маха – Цендера (ММЦ),

параллельная модуляция по интенсивности и фазе в поляризационных модуляторах (ПолМ) и др. В последнее время появились данные об использовании только амплитудной модуляции с подавлением оптической несущей, как в ММЦ, так и в ПолМ, при их работе в «нулевой» точке модуляционной характеристики. При этом модуляция в ПолМ рассматривается как более эффективная по энергетическим характеристикам с возможностью повышения чувствительности измерений.

Наиболее перспективной измерительной технологией построения ОЭС ИМЧР на сегодняшний день является технология различения частот с преобразованием типа «частота – амплитуда» в волоконных средах, в том числе в волоконных решетках Брэгга (ВРБ) [6–8]. Преимущества ВРБ заключаются в уникальном преобразовании измеряемой частоты в амплитуду отраженного или прошедшего через нее излучения оптической несущей, промодулированной оцениваемым радиосигналом, и в возможности простого изготовления. Одна ВРБ способна преобразовывать достаточно широкий частотный спектр. Так, при полной ширине решетки на полувысоте в 0,3 нм (типовой размер) диапазон измеряемых частот составит до 10–15 ГГц. Для оптико-электронного преобразования используется детектирование амплитуд составляющих, несущих информацию об измеряемой частоте, либо в широкой полосе измеряемых частот, либо в области постоянного тока узкополосного фотоприемника.

В разработанных на сегодняшний день ОЭС ИМЧР практически отсутствуют: дешевые узкополосные фотоприемники (как правило, используются дорогостоящие широкополосные с полосой пропускания до 40–60 ГГц, что определяется принципами измерения); устройства измерительного различения с линейным преобразованием «частота – амплитуда», особенно в области «низких» частот, что объясняется использованием нелинейных волоконных перестраиваемых линий задержки, фотонных фильтров, ВРБ и т.д.; модули контроля спектрального состава источника оптической несущей, выходного излучения модулятора, положения центральной длины волны ВРБ, подверженных флуктуациям различной природы, в том числе температурным, что в итоге ухудшает их метрологические характеристики.

Этому способствует устоявшийся подход к ОЭС ИМЧР как к системе широкополосного прямого детектирования (ИМЧР по амплитуде боковых составляющих при наличии несущей). Лишь в ряде работ указывается на применение узкополосных приемников (ИМЧР по амплиту-

де боковых составляющих в области постоянного тока при подавлении несущей). При этом в обоих случаях ОЭС ИМЧР рассматриваются практически без учета внутренних шумов фотоприемника типа « $1/f$ » при детектировании по постоянному току и тепловых и дробовых шумов при прямом детектировании в полосе частот, что определяет чувствительность измерений в области «высоких» частот.

В последнее время значительное внимание уделяется технологиям определения спектральных характеристик волоконно-оптических избирательных структур, основанным на применении в качестве зондирующих симметричного двухчастотного или полигармонического непрерывного излучения с подавленной несущей, полученного из последней с помощью ее последовательного амплитудно-фазового модуляционного преобразования (АФМП) по методу Ильина – Морозова (100%-ная амплитудная модуляция одночастотного когерентного излучения с последовательной коммутацией фазы на π при прохождении огибающей амплитудно-модулированного излучения минимума) [9–12]. Его особенностями являются высокие спектральная чистота выходного излучения и коэффициент преобразования, а также возможность получения разностной частоты, равной частоте модуляции. Последняя особенность, никогда ранее не применявшаяся в приложениях оптико-электронных систем, и является основой для данной работы. При этом симметричные двухчастотные излучения, полученные по методу Ильина – Морозова, могут быть также использованы как опорные или зондирующие для контроля рабочих режимов элементов ОЭС ИМЧР, реализующих модуляционное и измерительное преобразование в условиях влияния на них изменяющихся температур.

2. Требования к структуре ОЭС ИМЧР

Лучшее на сегодняшний день структурное решение ОЭС ИМЧР получено на основе измерительного преобразования «частота – амплитуда» в ВРБ, что позволяет реализовать низкочастотное фотодетектирование и значительно снизить стоимость ОЭС в целом. Основные недостатки ОЭС ИМЧР с ВРБ – монотонность характеристик измерительного преобразования в области центральной длины волны и высокий уровень отклика решеток на температуру и деформации. На преодоление аналогичных ограничений в сенсорных и телекоммуникационных системах направлено применение специальных структур ВРБ, например с фазовым π -сдвигом,

и двухчастотных методов зондирования ВРБ с анализом параметров их огибающей на разностной частоте для контроля положения центральной длины волны ВРБ или измерения с ее помощью температуры.

Дополнительные негативные факторы для ОЭС ИМЧР вносит характер модуляционного преобразования оптической несущей. При реализации амплитудной или фазовой модуляции ширина полосы частот, определяемая боковыми полосами, как правило, в два или четыре раза больше измеряемой частоты. Это приводит к необходимости использования «широкополосных» ВРБ до 1 нм, которые, как правило, имеют невысокий коэффициент отражения, более монотонный характер огибающей в области резонанса, в ряде случаев потребуется применение более широкополосного фотоприемника, стоимость которого значительно увеличивается с ростом полосы измеряемых частот.

Анализ работ по созданию ОЭС ИМЧР с преобразованием «частота – амплитуда» в ВРБ показал, что малое количество публикаций, в которых решены лишь частные вопросы, посвященные указанной тематике, не позволяет обоснованно подойти к выбору путей устранения указанных выше недостатков, а созданные на их основе ОЭС ИМЧР не удовлетворяют пользователей по требуемым характеристикам. Поэтому базовым акцентом настоящего исследования стал подход к разработке ОЭС ИМЧР с преобразованием «частота – амплитуда» в ВРБ как к «узкополосным» системам, требующим минимизации полосы частот для измерений, формируемой при модуляционном преобразовании, минимизации зон монотонности огибающих ВРБ, минимизации уровня шумов при оптико-электронном преобразовании и минимизации своей структуры с целью уменьшения влияния изменяющихся температур на параметры рабочих режимов измерительного преобразования и на погрешность ИМЧР в целом.

Проведенный анализ позволил сформировать основные требования к проектированию ОЭС ИМЧР, которые заключаются в необходимости использования в его структуре только одного лазера, как минимум одного модулятора, одной ВРБ и по возможности только одного фотоприемника, причем узкополосного [13–17]. Для метрологических характеристик ОЭС ИМЧР сформированы следующие требования: диапазон по частоте – до 40 ГГц, диапазон по амплитуде – до 50 дБ, погрешность – до $\pm 0,2$ ГГц. Общие требования к каналам мониторинга рабочих режимов определяются необходимостью применения симмет-

ричного двухчастотного излучения для контроля положения центральной длины волны ВРБ и контроля положения рабочей точки амплитудных модуляторов [18, 19]. Оба канала должны быть построены с использованием универсальных для ОЭС элементов, в том числе узкополосных фотоприемников, чтобы не повышать стоимость системы в целом.

3. Амплитудно-фазовое модуляционное преобразование оптической несущей

Кратко обсудим особенности АФМП и формирования радиосигналом симметричного двухчастотного излучения с подавленной несущей. Для анализа была рассмотрена классическая обобщенная схема однопортового радиофотонного звена для модуляционного преобразования оптической несущей [20], которая была трансформирована из параллельной в схему последовательного типа (рис. 1) с целью реализации АФМП по методу Ильина – Морозова.

В результате проведенных исследований теоретически показана возможность реализации АФМП на основе последовательно расположенных амплитудного и фазового ММЦ. Получены соотношения для расчета спектра излучения на выходе системы модуляторов при реализации указанного АФМП оптической несущей. Впервые показано, что при реализации АФМП возможно получение разностной частоты, равной измеряемой частоте радиосигнала. При этом оптимальными коэффициентами модуляции являются: $m = 5/9$ в случае использования модулирующего колебания вида $S_1(t) = S \cos(2\Omega t + \pi)$ и $m = 1$ в случае колебания вида $S_2(t) = S |\sin \Omega t|$ («выпрямленная» синусоида), где $\Omega = f_{RF} / 2$, а f_{RF} – частота радиосигнала.

Рис. 1. Обобщенная структурная схема однопортового радиофотонного звена модуляционного преобразования последовательного типа

Спектр излучения для двух составляющих на выходе модуляторов в случае $S_1(t)$ описывается выражением

$$E_{\text{АФМ}}(t) = 0,49E_0 \{ \sin(\omega + \Omega)t - \sin(\omega - \Omega)t \} + \\ + 0,007E_0 \{ \sin(\omega + 3\Omega)t - \sin(\omega - 3\Omega)t \} + \dots, \quad (1)$$

а в случае модуляции колебанием $S_2(t)$:

$$E_{\text{АФМ}}(t) = 0,56E_0 \{ \sin(\omega_0 + \Omega)t - \sin(\omega_0 - \Omega)t \} + \\ + 0,05E_0 \{ \sin(\omega_0 + 3\Omega)t - \sin(\omega_0 - 3\Omega)t \} + \dots \quad (2)$$

Как видно из (1) и (2), разностная частота между составляющими двухчастотного излучения 2Ω равна частоте модулирующего сигнала f_{RF} . Составляющие высших гармоник можно не учитывать в силу малости их амплитуд. Получено сужение разностной частоты в два раза по сравнению с классическими схемами ее удвоения, применяемыми в практике известных ОЭС ИМЧР, при использовании одного амплитудного ММЦ, работающего для подавления несущей в «нулевой» точке модуляционной характеристики.

4. Способы улучшения метрологических характеристик ОЭС ИМЧР

В данном разделе рассмотрим три метода улучшения характеристик существующих ОЭС ИМЧР, заключающиеся в расширении диапазона, повышении разрешающей способности измерений в области «низких» и чувствительности измерений в области «высоких» измеряемых частот.

Представим краткое теоретическое обоснование способа ИМЧР с расширением диапазона измерительного преобразования по частоте в два раза. Структурная схема для его реализации показана на рис. 2, а, пояснения к принципу работы – на рис. 2, б, а полученная измерительная характеристика – на рис. 2, в. Оптическая несущая с лазерного диода ЛД на частоте f_0 поступает на блок модуляторов БМ, где модулируется неизвестным по частоте f_{RF} и амплитуде A_{RF} СВЧ-сигналом, а затем разделяется на два канала в оптическом разветвителе ОР.

По первому каналу излучение через вход циркулятора Ц поступает на ВРБ, отражается от нее и с выхода Ц подается на первый фотоприем-

Рис. 2. К теоретическому обоснованию способа расширения диапазона измеряемых частот: а – структурная схема; б – спектральное представление; в – измерительная характеристика

ник ФД1. Второй канал с ФД2 используется как опорный. Находя в микроконтроллере МК определения параметров неизвестного СВЧ-сигнала отношение амплитуд сигналов на выходе ФД1 и ФД2, получаем функцию сравнения амплитуд (ФСА), которая однозначно зависит от частоты СВЧ-сигнала и не зависит от мощности излучения лазера.

Выходное излучение БМ, согласно (1) или (2), представляет собой двухчастотное на частотах $f_0 - f_{RF}/2$ и $f_0 + f_{RF}/2$ с подавленной несущей f_0 . Амплитуды составляющих равны A_{-1} и A_{+1} и определяются значениями функций Бесселя первого рода. Ток на выходе ФД2 в опорном канале пропорционален:

$$i(t) \propto A_{-1}^2 + A_{+1}^2 + A_{-1}A_{+1}\cos 2\pi f_{RF}t, \quad (3)$$

а мощность при детектировании по постоянному току при $A_{-1} = A_{+1} = A_1$

$$P_{RF} \propto A_{-1}^2 + A_{+1}^2 = 2A_1^2. \quad (4)$$

Для измерительного преобразования «частота – амплитуда» выберем классическую ВРБ с гауссовым профилем огибающей центральной частотой f_B , которая характеризуется различным коэффициентом отражения для различных частот (см. рис. 2, б), определяемых зависимостью

$$R(f_{RF}) = R_B \exp \left[-4 \ln 2 \left[(f_{RF} - f_B) / \Delta f_B \right]^2 \right], \quad (5)$$

где R_B – коэффициент отражения на f_0 ; Δf_B – полная ширина ВРБ на полувысоте.

Таким образом, при настройке центральной частоты ВРБ на частоту оптической несущей составляющие двухчастотного излучения, отраженные от ВРБ, в зависимости от частоты будут иметь амплитуду

$$A_{-1}^{RRF} = A_{+1}^{RRF} = A_1 R(f_{RF}), \quad (6)$$

а мощность на выходе ФД1 в измерительном канале

$$P_{RRF} \propto 2A_1^2 R^2(f_{RF}). \quad (7)$$

Определив частотно-зависимую функцию отношения мощностей как $\rho = P_{RRF} / P_{RF}$, получим

$$\rho = R^2(f_{RF}). \quad (8)$$

На рис. 2, в показана однозначная зависимость между ρ и f_{RF} , рассчитанная в пакете MatLab 7.1.0, которая не зависит от мощности излучения лазера и мощности СВЧ-сигнала. Таким образом, зная только отношение мощностей ρ , мы можем определить мгновенную частоту неизвестного СВЧ-сигнала f_{RF} . Амплитуда неизвестного СВЧ-сигнала определяется по выходному сигналу ФД2 при калиброванной мощности DFB-лазера и известных характеристиках модуляционного преобразования в БМ.

Разностная частота между составляющими двухчастотного сигнала равна измеряемой частоте, что позволяет в два раза расширить диапазон измеряемых частот по сравнению с классическими методами ИМЧР при заданной полной ширине ВРБ на полувысоте.

Далее рассмотрим способ ИМЧР с повышением разрешающей способности измерений в области «низких» измеряемых частот. При

использовании классической ВРБ в зоне «низких» частот наблюдается монотонность ее огибающей (см. рис. 2, б), что приводит к снижению разрешающей способности измерений. Для ее повышения была использована ВРБ с фазовым π -сдвигом и со специальной формой АЧХ, имеющая окно прозрачности в области «низких» частот, что позволило создать двухдиапазонную установку, структурная схема которой представлена на рис. 3, а, пояснения к принципу работы – на рис. 3, б, а полученная измерительная характеристика – на рис. 3, в.

Для разделения диапазонов была использована заграждающая ВРБ2 прямоугольной формы (рис. 3, г) в диапазоне частот от f_1 до f_2 (± 4 ГГц) для организации двух каналов до 4 ГГц и выше и специальный алгоритм коммутации последних в МК. При наличии измеряемых частот в диапазоне свыше 4 ГГц работает канал с ФД1.1, канал с ФД1.2 блокируется МК. При измерении частот до 4 ГГц канал с ФД1.2 включается с МК, поскольку уровень сигнала в канале с ФД1.1 ниже заданного порогового.

Рис. 3. К теоретическому обоснованию способа повышения разрешающей способности измерений в области «низких» измеряемых частот:

а – структурная схема; б – спектральное представление;
в – измерительная характеристика; г – контур заграждающей ВРБ2

Результаты численных расчетов в пакете MatLab 7.1.0, подтвердившие возможность повышения разрешающей способности в области «низких» частот до уровня разрешающей способности в области «средних» и «высоких» частот 0,8–1 ГГц/дБ, показаны на рис. 3, в.

На основе анализа шумовых характеристик ОЭС, реализующих различные варианты приема двухчастотного излучения (в полосе измеряемых частот и на постоянной составляющей), был предложен способ расщепления составляющих двухчастотного излучения на фиксированную разностную частоту $f_{DF} = 100$ МГц, лежащую в области минимальных шумов фотоприемника (рис. 4, а). Это обеспечило узкополосный прием измеряемых составляющих и регистрацию их амплитуды по огибающей расщепленных составляющих (рис. 4, б) на f_{DF} при фильтрации в блоках частотной селекции БЧС (узкополосный фильтр с центральной частотой 100 МГц и минимальной полосой, определяемой шириной излучения лазера). Повышение чувствительности измерений по сравнению

Рис. 4. К теоретическому обоснованию способа повышения чувствительности измерений в области «высоких» измеряемых частот: а – спектральное представление; б – структурная схема приемной части; в – структурная схема передающей части

с методом прямого детектирования в полосе частот составило 3–6 раз, причем было снижено влияние фликкер-шумов фотоприемников на точность амплитудных измерений. Структурная схема разработанной ОЭС ИМЧР на уровне модуляционного преобразования показана на рис. 4, *в* и отличается от представленной на рис. 2, *а* наличием второго амплитудного ММЦ, работающего в режиме подавления несущей частоты в «нулевой» точке. Проведено имитационное моделирование разработанных способов, выполненное в пакете прикладных программ OptiSystem 7.0. Вставленные в схему двухдиапазонная ВРБ 1.1 и заграждающая ВРБ 1.2 моделировались в пакете OptiGrating 4.2. Были подтверждены результаты теоретических исследований и разработана обобщенная схема ОЭС ИМЧР, учитывающая преимущества всех разработанных способов.

5. Практические рекомендации по построению ОЭС ИМЧР на основе АФМП оптической несущей

С точки зрения конструктивной простоты для использования в ОЭС ИМЧР рекомендованы ПолМ фирмы Versawave Inc., обладающие рядом преимуществ по сравнению с классическими ММЦ и позволяющие реализовать АФМП в диапазоне частот до 50 ГГц, при температурах до +70 °С. Варианты выполнения структурного требования к ОЭС ИМЧР о реализации модуляционного преобразования только на одном модуляторе заключаются в использовании сдвоенных двухпортовых ММЦ или ПолМ. Для решения задач импортозамещения и максимального приближения к реализации АФМП рекомендовано обратить внимание на ЭОМ интегрального типа производства ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (г. Пермь).

Для построения ОЭС ИМЧР, использующих двухчастотные способы измерительного преобразования «частота – амплитуда», требуются ВРБ с фазовым π -сдвигом и коэффициентом пропускания окна прозрачности 95–99 %, полуширина которого может изменяться в диапазоне 0,01–0,02 нм. Данные решетки также могут использоваться как заграждающий фильтр для ослабления не до конца подавленной несущей при модуляционном преобразовании. Разработка способов записи указанных решеток при внесении неоднородности между фазовой маской и волокном диаметром до 2 мкм позволила создать ВРБ специального типа. Анализ АЧХ решетки, зарегистрированной на анализаторе спектра FTV 5240-Sc разрешением 2 пм, показал наличие в нем окна

прозрачности шириной 100 пм (~ 12 ГГц), расположенного на центральной длине волны 1552,6 нм и разделяющего ВРБ на две с полной шириной 200 пм (~ 24 ГГц). Полученный тип решетки позволил реализовать ОЭС ИМЧР с двумя диапазонами измерений. Преобразование «частота – амплитуда» проводилось в окне прозрачности для частот диапазона от 0,3 до 12 ГГц и в полосе отражения для частот 12–24 ГГц.

Измерения мгновенной частоты радиосигнала СВЧ-диапазона проводились на экспериментальной макетной установке с использованием модуляторов JDSUAPEMicrowaveAnalog и JDSUAPEPhase. Для двухдиапазонного измерительного преобразования использовалась ВРБ со специальной формой АЧХ. В качестве элемента для оптико-электронного преобразования использовался фотодиод FDI с полосой пропускания 1,5 ГГц, реализовывалось прямое детектирование по постоянному току.

На рис. 5 показаны измерительные характеристики для диапазона 5–10 ГГц, на рис. 6 – для 0,3–5 ГГц.

Рис. 5. Измерительная характеристика ОЭС ИМЧР в диапазоне 5–10 ГГц (двухдиапазонная решетка)

Как видно из рис. 5–6, наблюдается некоторая нелинейность на концах диапазона. Максимальная погрешность измерения в обоих диапазонах составила на краях диапазонов 200 МГц. Отсутствие на рис. 6 данных для частот в области 5 ГГц вызвано неточностью изготовления загрязжающей ВРБ с прямоугольной формой АЧХ и некоторым наклоном ее фронтов. Крутизна наклона характеристики в диапазоне частот 0,3–5 ГГц составила 0,2 ГГц/мВ, а в диапазоне частот 5–10 ГГц – 0,5 ГГц/мВ, что определялось крутизной склонов используемой изме-

рительной решетки. Метод расщепления спектральных составляющих на данной макетной установке для ИМЧР не реализовывался. Оценочный расчет технико-экономических показателей при реализации ОЭС ИМЧР с АФМП показал, что по сравнению с существующими системами стоимость такой реализации может быть в 3–4 раза меньше стоимости типовой широкополосной системы.

Рис. 6. Измерительная характеристика ОЭС ИМЧР в диапазоне 0,3–5 ГГц (двухдиапазонная решетка)

При поиске путей создания интегральных узлов и модулей ОЭС ИМЧР, предназначенных для комплексного уменьшения влияния внешних условий эксплуатации на их характеристики, перспективным может быть создание интегральных модулей следующих типов: «антенна – ММЦ» в размерах ММЦ, измерительного преобразования «частота – амплитуда» на основе управляемой по характеристикам ВРБ или кольцевых резонаторов, мониторинга положения рабочей точки ММЦ с учетом спектральных процедур оценивания величины и знака ее ухода. При этом опорные значения для процедур регулирования могут быть взяты из схем контроллера температуры ЛД, имеющих широкое практическое применение и позволяющих определять и поддерживать температуру в пределах $\pm 0,1$ °С.

6. Заключение

На основе систематизации и анализа информации о существующих и перспективных ОЭС ИМЧР СВЧ-диапазона с измерительным преобразованием «частота – амплитуда» в ВРБ определены возможные

пути улучшения их метрологических и технико-экономических характеристик. Показано, что дальнейшее развитие систем указанного класса может быть основано на применении в них АФМП оптической несущей как для измерения мгновенной частоты, так и для обеспечения стабильности рабочих режимов устройств преобразования.

По результатам анализа особенностей АФМП оптической несущей в симметричное двухчастотное излучение, расщепления его составляющих на фиксированную разностную частоту, лежащую в области минимальных шумов фотоприемника, их двухдиапазонного измерительного преобразования «частота – амплитуда» в ВРБ со специальной формой АЧХ и оптико-электронного преобразования в узкополосном фотоприемнике разработаны способы для расширения диапазона ИМЧР в 2 раза, повышения разрешающей способности измерений в области «низких» частот до уровня среднего по системе 0,8–1 ГГц/дБ, повышения чувствительности измерений в 3–6 раз по сравнению с широкополосным фотодетектированием и снижением влияния низкочастотных флуктуаций на точность измерений по амплитуде.

На базе предложенных способов разработаны и созданы макеты устройств преобразования ОЭС ИМЧР с улучшенными метрологическими и технико-экономическими характеристиками. Разработаны рекомендации по их проектированию и применению в зависимости от требований, предъявляемых к ним решаемыми задачами и условиями эксплуатации конкретной системы, в том числе на уровне выбора типа модулятора, изготовления ВРБ со специальной формой АЧХ, интегральных решений для комплексного устранения влияния температурных флуктуаций. При этом стоимость типовой реализации ОЭС ИМЧР на их основе может быть в 3–4 раза меньше стоимости типовой широкополосной системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части государственного задания, выполняемого Казанским национальным исследовательским техническим университетом им. А.Н. Туполева (КАИ) на кафедре радиофотоники и микроволновых технологий и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (программа «Радиофотоника», 3.1962.2014/К).

Список литературы

1. East P.W. Fifty years of instantaneous frequency measurement // IET Radar Sonar Navig. – 2012. – Vol. 6, iss. 2. – P. 112–122.
2. A fully photonics-based coherent radar system / P. Ghelfi [et al.] // Nature. – 2014. – Vol. 507. – P. 341–345.
3. Zou X.H., Pan S.L., Yao J.P. Instantaneous microwave frequency measurement with improved measurement range and resolution based on simultaneous phase modulation and intensity modulation // J. Lightw. Technol. – 2009. – Vol. 27, no. 23. – P. 5314–5320.
4. Photonic measurement of microwave frequency based on phase modulation / J.Q. Zhou [et al.] // Opt. Exp. – 2009. – Vol. 17. – P. 7217–7221.
5. Wei Li, NingHua Zhu, Li Xian Wang. Reconfigurable instantaneous frequency measurement system based on dual-parallel Mach–Zehnder-modulator // Journal of Photonics. – 2012. – Vol. 4, no. 2. – P. 427–436.
6. Photonic instantaneous measurement of microwave frequency using fiber Bragg grating / Z. Li [et al.] // Opt. Commun. – 2010. – Vol. 283. – P. 396–399.
7. Microwave frequency measurement using fiber Bragg grating as V-shape filter / Xiaomin Zhang [et al.] // Proc. of 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation. – 2010. – P. 921–924.
8. Instantaneous microwave frequency measurement using a special fiber Bragg grating / Ze Li [et al.] // IEEE microwave and wireless components letters. – 2011. – Vol. 21, no. 1. – P. 1346–1348.
9. Synthesis of two-frequency symmetrical radiation and its application in fiber optical structures monitoring / O. Morozov [et al.] // Fiber Optic Sensors. – 2012. – Ch. 6. – P. 137–165. – URL: <http://www.intechopen.com/books/fiber-optic-sensors/synthesis-of-two-frequency-symmetrical-radiation-and-its-application-in-fiber-optical-structures-mon>.
10. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. Синтез двухчастотного излучения и его применения в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13, № 3. – С. 84–91.
11. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 1. – С. 3–42.

12. Формирование многочастотного излучения в двухпортовом модуляторе Маха-Цендера / А.А. Севастьянов [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 4. – С. 232–236.

13. Измерение мгновенной частоты с помощью двухчастотного зондирования / О.Г. Морозов [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 146–149.

14. Измерение мгновенной частоты СВЧ-радиосигналов в оптическом диапазоне на основе преобразования «частота – амплитуда» в волоконной решётке Брэгга с фазовым π -сдвигом / О.Г. Морозов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2013. – № 3. – С. 30–41.

15. Instantaneous frequency measurement using double-frequency probing / O.G. Morozov [et al.] // Proc. of SPIE. – 2013. – Vol. 8787. – P. 878708.

16. Morozov O.G., Nurgazizov M.R., Talipov A.A. Double-frequency method for the instantaneous frequency and amplitude measurement // Proc. of IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13). – 2013. – P. 381–383.

17. Instantaneous frequency measurement of microwave signals in optical range using “frequency-amplitude” conversion in the π -phase-shifted fiber Bragg grating / O.G. Morozov [et al.] // Proc. of SPIE. – 2014. – Vol. 9136. – P. 91361B.

18. Instantaneous microwave frequency measurement with monitoring of system temperature / O.G. Morozov [et al.] // Proc. of SPIE. – 2014. – Vol. 9156. – P. 91560N.

19. Нургазизов М.Р. Двухчастотная система измерения мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона с температурной стабилизацией [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4 (54). – URL: www.science-education.ru/118-14134.

20. Gasulla I., Capmany J. Analytical model and figures of merit for filtered microwave photonic links // Opt. Exp. – 2011. – Vol. 19, no. 20. – P. 19758–19774.

References

1. East P.W. Fifty years of instantaneous frequency measurement. *IET Radar Sonar Navig.* 2012, vol. 6, iss. 2, pp. 112–122.

2. Ghelfi P. [et al.] A fully photonics-based coherent radar system. *Nature*, 2014, vol. 507, pp. 341–345.

3. Zou X.H., Pan S.L., Yao J.P. Instantaneous microwave frequency measurement with improved measurement range and resolution based on simultaneous phase modulation and intensity modulation. *J. Lightw. Technol.*, 2009, vol. 27, no. 23, pp. 5314-5320.

4. Zhou J.Q. [et al.]. Photonic measurement of microwave frequency based on phase modulation. *Opt. Exp.*, 2009, vol. 17, pp. 7217-7221.

5. Wei Li, NingHua Zhu, Li Xian Wang. Reconfigurable instantaneous frequency measurement system based on dual-parallel Mach-Zehnder-modulator. *Journal of Photonics*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 427-436.

6. Li Z. [et al.]. Photonic instantaneous measurement of microwave frequency using fiber Bragg grating. *Opt. Commun.*, 2010, vol. 283, pp. 396-399.

7. Zhang X. [et al.]. Microwave frequency measurement using fiber Bragg grating as V-shape filter. *Proc. of 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, 2010, pp. 921-924.

8. Li Ze [et al.]. Instantaneous microwave frequency measurement using a special fiber Bragg grating. *IEEE microwave and wireless components letters*, 2011, vol. 21, no. 1, pp. 1346-1348.

9. Morozov O. [et al.]. Synthesis of two-frequency symmetrical radiation and its application in fiber optical structures monitoring. *Fiber Optic Sensors*, 2012, ch. 6, pp. 137-165, available at: <http://www.intechopen.com/books/fiber-optic-sensors/synthesis-of-two-frequency-symmetrical-radiation-and-its-application-in-fiber-optical-structures-mon>.

10. Morozov O.G., Aibatov D.L., Sadeev T.S. Sintez dvukhchastnogo izlucheniia i ego primeneniia v volokonno-opticheskikh sistemakh raspredelennykh i mul'tipleksirovannykh izmerenii [Synthesis of dual-frequency radiation and its applications in fiber-optic systems, distributed and multiplexed measurements]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2010, vol. 13, no. 3, pp. 84-91.

11. Morozov O.G., Il'in G.I. Amplitudno-fazovaia moduliatsiia v sistemakh radiofotoniki [Amplitude and phase modulation systems radiophonique]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya "Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy"*, 2014, no. 1, pp. 3-42.

12. Sevast'ianov A.A. [et al.]. Formirovanie mnogochastotnogo izlucheniia v dvukhportovom moduliatore Makha-Tsendera [The formation of multi-frequency radiation in a dual-port modulator of the Mach-Zehnder]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2013, no. 4, pp. 232-236.

13. Morozov O.G. [et al.]. Izmerenie mgnovennoi chastoty s pomoshch'iu dvukhchastotnogo zondirovaniia [The measurement of instantaneous frequency using dual-frequency sensing]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2012, no. 4, pp. 146-149.

14. Morozov O.G. [et al.]. Izmerenie mgnovennoi chastoty SVCh-radiosignalov v opticheskom diapazone na osnove preobrazovaniia "chastota – amplituda" v volokonnoi reshetke Bregga s fazovym π -sdvigom [Measuring the instantaneous frequency of the microwave signals in the optical range based on the transformation of the frequency - amplitude in the fiber Bragg grating phase with the displacement]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriia "Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy"*, 2013, no. 3, pp. 30-41.

15. Morozov O.G. [et al.]. Instantaneous frequency measurement using double-frequency probing. *Proc. of SPIE*, 2013, vol. 8787, pp. 878708.

16. Morozov O.G., Nurgazizov M.R., Talipov A.A. Double-frequency method for the instantaneous frequency and amplitude measurement. *Proc. of IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13)*, 2013, pp. 381-383.

17. Morozov O.G. [et al.]. Instantaneous frequency measurement of microwave signals in optical range using "frequency-amplitude" conversion in the π -phase-shifted fiber Bragg grating. *Proc. of SPIE*, 2014, vol. 9136, pp. 91361B.

18. Morozov O.G. [et al.]. Instantaneous microwave frequency measurement with monitoring of system temperature. *Proc. of SPIE*, 2014, vol. 9156, pp. 91560N.

19. Nurgazizov M.R. Dvukhchastotnaia sistema izmereniia mgnovennoi chastoty radiosignalov SVCh-diapazona s temperaturnoi stabilizatsiei [Dual-frequency system for measuring the instantaneous frequency of the radio signals in the microwave range with temperature stabilization]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2014, no. 4 (54), available at: www.science-education.ru/118-14134.

20. Gasulla I., Capmany J. Analytical model and figures of merit for filtered microwave photonic links. *Opt. Exp.*, 2011, vol. 19, no. 20, pp. 19758-19774.

Получено 25.11.2014