

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 621.373, 621.391.64

Л. М. Белкин, М. Е. Белкин,
Московский государственный технический
университет радиотехники, электроники и
автоматики (МГТУ МИРЭА),
e-mail: belkin@mirea.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И РАЗМНОЖЕНИЯ ЧАСТОТ СИГНАЛОВ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Поступила в редакцию 23.08.2011

Теоретически и экспериментально исследуется экономичная схема построения оптоэлектронного преобразователя частоты на базе поверхностно излучающего лазера с вертикальным резонатором (VCSEL). Приводятся результаты разработки моделей, описывающих его работу в режимах преобразования (ОЭПЧ) и размножения (ОЭРЧ) частот СВЧ диапазона, и расчета ключевого параметра преобразователя частоты — потерь преобразования. Согласно результатам расчетов и близким к ним экспериментальным данным, полученным с помощью разработанных макетов S-диапазона, потери повышающего преобразования ОЭПЧ составляют около 36 дБ, а ОЭРЧ — около 45 дБ. Рассматривается пример построения на базе ОЭРЧ экономической схемы обратного канала базовой станции перспективной телекоммуникационной системы волоконно-эфирной структуры.

Ключевые слова: *сверхвысокочастотная оптоэлектроника, поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором (VCSEL), оптоэлектронный преобразователь частоты, волоконно-эфирная телекоммуникационная система (RoF)*

Введение

Ключевым узлом передающих и приемных устройств современных радиосистем сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, во многом определяющим их общие технико-экономические показатели, считается преобразователь частоты, принципиальными структурными элементами которого

являются, как известно, смеситель и гетеродин [1]. В связи с этим исследованиям теоретических и практических аспектов их функционирования, а также схем построения посвящено огромное количество публикаций в периодической и книжной научной литературе. Традиционное направление развития данного узла в СВЧ аппаратуре состоит в использовании технологии монолитных интегральных схем повышенного уровня функциональности [2, 3]. Такой подход может быть назван микроэлектронным. Перспективным альтернативным путем совершенствования принципов построения приборов и устройств СВЧ диапазона на сегодняшний день считается оптоэлектронный подход, позволяющий преодолеть фундаментальные частотные ограничения активных полупроводниковых приборов [4].

Построенный на этом принципе оптоэлектронный преобразователь частоты (ОЭПЧ) СВЧ сигналов представляет собой новый, пока еще слабо изученный, класс приборов сверхвысокочастотной оптоэлектроники [5]. Принципиальным достоинством ОЭПЧ считается предельная широкополосность, недостижимая для традиционных транзисторных и диодных преобразователей частоты СВЧ диапазона. Тем не менее, вследствие чрезмерно высоких потерь преобразования ОЭПЧ пока не может конкурировать с существующими преобразователями частоты даже в монолитном исполнении. Наибольший выигрыш ОЭПЧ по сравнению с преобразователями на МИС можно ожидать в диапазоне крайне высоких частот (КВЧ: 30...300 ГГц) и в терагерцевом диапазоне (0,3...3 ТГц), где традиционные преобразователи частоты на СВЧ диодах и транзисторах имеют существенно худшие технико-экономические показатели по сравнению с более низкими частотными диапазонами [4]. Однако в настоящее время оптоэлектронная компонентная база с такими сверхширокими полосами пропускания находится на уровне лабораторных исследований, поэтому представляет интерес исследование фундаментальных свойств ОЭПЧ данного класса для преобразования частоты в нижней части СВЧ диапазона.

Цель данной статьи — анализ существующих схем построения ОЭПЧ, моделирование и экспериментальное исследование наиболее экономичной схемы ОЭПЧ с использованием нелинейности

характеристики электрооптического преобразования полупроводникового лазерного излучателя (ПЛИ), а также его упрощенного варианта построения, названного оптоэлектронным размножителем частот (ОЭРЧ) СВЧ диапазона.

Анализ схем построения оптоэлектронного преобразователя частоты

Принцип преобразования частоты в ОЭПЧ остается традиционным: за счет смешения на нелинейном элементе входного сигнала и сигнала опорного генератора. На начальном этапе исследований были сделаны попытки формирования радиосигнала за счет смешения в фотодетекторе двух немодулированных сигналов лазерных излучателей с разностью частот оптических несущих в СВЧ диапазоне [6]. Однако при реализации ОЭПЧ данного типа на полупроводниковых лазерах возникают значительные технико-экономические трудности, поэтому в настоящее время в качестве входного и опорного сигналов предпочтительно используются сигналы СВЧ генераторов соответствующих частот [5]. Анализ существующих схем построения ОЭПЧ показывает, что для генерации продуктов нелинейного смешения в них исследованы следующие эффекты:

- прямая модуляция ПЛИ [7];
- внешняя модуляция пассивного электрооптического модулятора [8, 9];
- управление характеристикой передачи полупроводникового лазерного усилителя [10];
- управление характеристикой оптико-электрического преобразования фотодиода [11];
- комбинация указанных выше эффектов [5, 10].

В свою очередь, проведенный анализ результатов экспериментальных исследований показал, что среди известных схем ОЭПЧ наиболее простой для реализации является схема с использованием внешнего модулятора, а наибольшую эффективность по критерию параметры/цена имеет подход с использованием прямой модуляции по интенсивности излучения ПЛИ, особенно в случае применения поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором типа VCSEL [12].

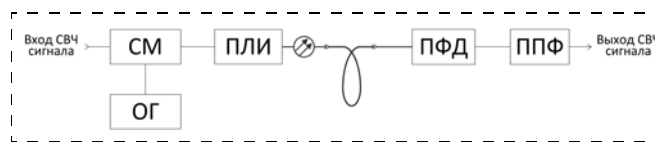


Рис. 1. Структурная схема оптоэлектронного преобразователя частоты СВЧ сигнала с использованием нелинейности лазерного излучателя

Моделирование оптоэлектронного преобразователя частоты сигналов СВЧ диапазона

Структурная схема варианта ОЭПЧ с использованием в качестве нелинейного элемента полупроводникового лазерного излучателя представлена на рис. 1.

На приведенной схеме входной сигнал и сигнал от опорного генератора (ОГ) смешиваются в пассивном сумматоре мощности (СМ). Смешанный СВЧ сигнал поступает на управляющий вход ПЛИ. Модулированное им оптическое излучение передается с помощью короткого отрезка волокна и детектируется полупроводниковым фотодетектором (ПФД). Сигнал преобразованной частоты выделяется из спектра радиосигналов с помощью полосно-пропускающего фильтра (ППФ).

Моделирование характеристик схемы ОЭПЧ проводилось с помощью специализированной оптоэлектронной САПР *VPItransmission Maker™* фирмы *VPI Systems*. В данной САПР общую модель устройства можно разработать, выбирая из библиотеки встроенные модели необходимых для построения его схемы оптоэлектронных, оптических либо электронных элементов, что значительно сокращает время и упрощает процесс моделирования. Реализация схемы ОЭПЧ (рис. 1) на базе ПЛИ типа VCSEL в данном программном пакете представлена на рис. 2.

В процессе моделирования рассчитывался ключевой параметр преобразователя частоты — потери преобразования. В данном случае это разность мощностей в децибелах на модулирующем

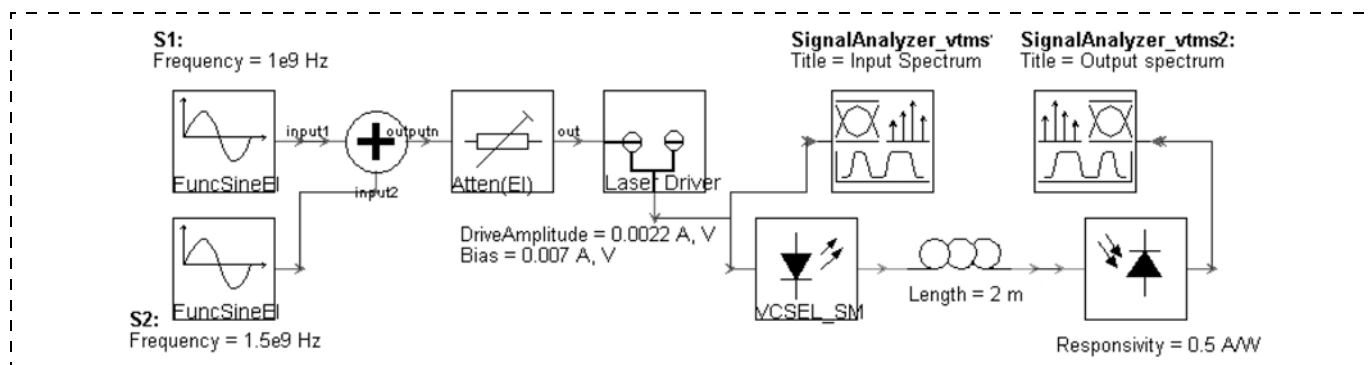


Рис. 2. Реализация модели ОЭПЧ с использованием нелинейности характеристики электрооптического преобразования лазера типа VCSEL в программном пакете *VPItransmission Maker™*

Моделирование оптоэлектронного размножителя частоты СВЧ диапазона

В целях дальнейшего повышения экономичности исследуемого в данной работе ОЭПЧ на базе лазера типа VCSEL был предложен и исследован его упрощенный вариант, названный оптоэлектронный размножитель частот (ОЭРЧ). Схема его реализации представляет собой ОЭПЧ (см. рис. 1), в котором отсутствуют опорный генератор и сумматор мощности. Суть предложенного подхода заключается в использовании известного в лазерной физике эффекта удвоения периода [14] при модуляции полупроводникового лазера мощным синусоидальным сигналом. При этом в спектре его излучения помимо основной частоты модуляции и ее высших гармоник появляются субгармоники и продукты их смешения с основной частотой и гармониками. Путем моделирования нам удалось подобрать такой режим работы лазера, чтобы уровни сигналов основной модулирующей частоты F , субгармоники $0,5F$ и продукта на частоте $1,5F$ получились примерно одинаковыми и достаточной величины, чтобы обеспечить требуемое в системах радиосвязи отношение сигнал/шум. Для наблюдения эффекта удвоения периода необходимо, чтобы лазер модулировался в режиме сверхбольшого сигнала: с отсечкой тока накачки, что подобно режиму класса C в электронном усилителе. При этом рабочую точку надо выбирать либо в припороговой области, либо на начальном участке квазилинейной области ВТАХ лазера.

Аналитическая модель VCSEL в режиме сверхбольшого модулирующего сигнала. Как известно [15], работа одномодового полупроводникового квантоворазмерного лазера, в данном случае исследуемого VCSEL, стандартно описывается системой скоростных уравнений количества носителей заряда в активной области, количества носителей заряда в барьерных слоях и количества фотонов на выходе лазера. Эти уравнения были решены в программном пакете MathCAD с помощью распространенного BDF-метода¹ путем варьирования геометрических, электро- и оптико-физических параметров лазерного кристалла. Данный метод является предпочтительным для так называемых жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений с большим числом шагов дифференцирования и малым шагом по времени. Решениями данной системы являются временные зависимости числа зарядов в активной и запирающей областях VCSEL и числа фотонов на выходе лазера. Последняя зависимость преобразуется в выходную оптическую мощность, и далее, с помощью быстрого преобразования Фурье, в ее спектральную характеристику. Для удобства сравнения с другими аналогичными результатами частота модулирующего сигнала нормируется по частоте электрон-фотонного резонанса исследуемого лазерного излучателя.

¹ Backward Differentiation Formula.

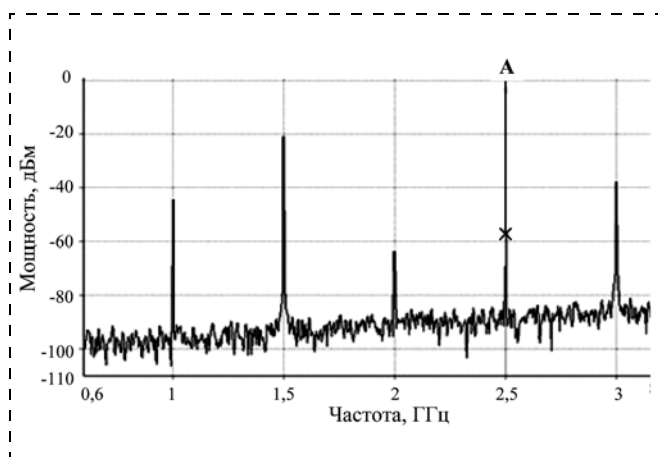


Рис. 3. Спектр сигналов на выходе ОЭПЧ S-диапазона с использованием нелинейности ПЛИ на базе VCSEL

входе ПЛИ на частоте входного сигнала и мощности на выходе фотодетектора на частоте выходного сигнала. С учетом полосы модуляции VCSEL [12] потери преобразования исследовали для выходных частот в дециметровом диапазоне волн. А именно, входной сигнал подавался на частоте 1 ГГц с мощностью -20 дБм, а гетеродинный сигнал — на частоте 1,5 ГГц с мощностью 6 дБм.

Рассчитанные спектры сигналов на выходе исследуемого ОЭПЧ представлены на рис. 3. Как следует из рисунка, мощность преобразованного выходного сигнала (маркер А) составляет -56 дБм на частоте 2,5 ГГц. То есть потери преобразования составили 36 дБ.

Таким образом, оптоэлектронный преобразователь частоты сигналов СВЧ диапазона имеет существенно большие потери преобразования по сравнению с традиционными устройствами на основе СВЧ транзисторов и диодов. Однако благодаря его принципиальной широкополосности (определяется исключительно полосой модуляции лазера и фотодетектора) в ОЭПЧ отсутствует свойственный микроэлектронным преобразователям частоты СВЧ диапазона эффект увеличения потерь по мере повышения рабочей частоты. Данный постулат подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований ОЭПЧ X-диапазона (8...12 ГГц) с использованием традиционного типа полупроводникового лазера с горизонтальным каналом и торцевым излучением [13]. А именно, подтвержденные экспериментом расчетные потери получились даже несколько меньше: 33 дБ на 10 ГГц. Однако, чтобы реализовать такие потери, для последнего варианта требуется на 14 дБ (в 25 раз) большая мощность гетеродина. Достоинством ОЭПЧ также является универсальность применения вследствие одинаковых схем повышающего и понижающего преобразователей частоты.

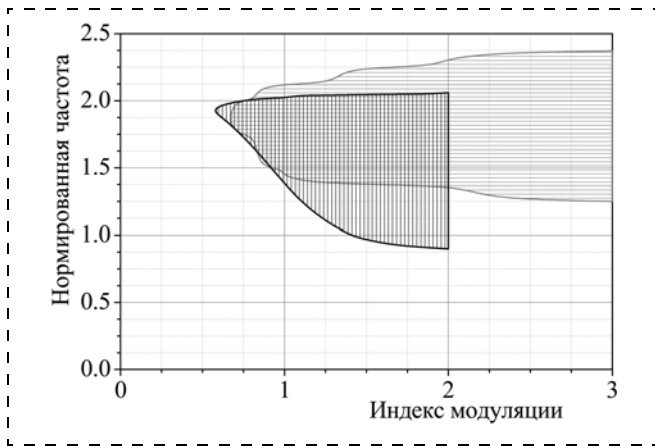


Рис. 4. Диаграмма для определения границ области эффективного режима размножения частот модуляции

По результатам модельных экспериментов на рис. 4 приведена двумерная диаграмма, характеризующая область эффективного режима размножения² частот модуляции (горизонтальная штриховка) в координатах "нормированная частота модуляции — индекс токовой модуляции" (здесь это отношение амплитуды переменной составляющей модулирующего тока к постоянному току смещения). Как следует из рисунка, эффективный процесс удвоения периода с уровнями близких субгармоник и продуктов смешения одного порядка с уровнем фундаментальной частоты возникает в ограниченном диапазоне токов постоянного смещения, а также амплитуд тока (мощности) и частот модулирующего сигнала. Причем он генерируется на частотах модуляции, превышающих частоту электрон-фотонного резонанса (и полосу модуляции) лазера, при индексах модуляции около либо более 1. Полученные результаты соответствуют известным данным. В частности, на том же рисунке представлены результаты моделирования эффекта удвоения периода (область с вертикальной штриховкой) для лазера с торцевым излучением [14]. Относительно большая область перекрытия³ свидетельствует о корректности разработанной модели.

Объектно-ориентированная модель ОЭРЧ. Полученные по результатам моделирования в пакете MathCAD данные о границах области эффективного режима размножения частот модуляции исследуемого VCSEL послужили основой для моделирования работы ОЭРЧ сигналов СВЧ диапазона с помощью использованной при моделировании ОЭПЧ САПР *VPTransmission Maker*TM. Разработанная модель представлена на рис. 5.

² Разница мощностей сигналов основной модулирующей частоты F , субгармоники на частоте $0,5F$ и продукта смешения на частоте $1,5F$ — не более 10 дБ.

³ В цитируемой статье исследование ограничено индексом модуляции 2.

Согласно рисунку в состав модели ОЭРЧ входят модель исследуемого лазера, модель фотодетектора, представляющего собой $p-i-n$ -фотодиод, полоса пропускания которого существенно больше верхней частоты рабочей полосы частот ОЭРЧ, и модель соединительного оптического тракта Att, в данном случае описывающая только потери при стыковке лазера и фотодетектора с коротким волокном. Для обеспечения соответствующего режима работы по постоянному и переменному токам лазерный диод смещается в прямом направлении с помощью модели лазерного драйвера. Через этот драйвер к лазеру подсоединена модель генератора синусоидального сигнала соответствующей амплитуды и частоты. Выход ОЭРЧ связан с моделью анализатора спектра радиочастотного диапазона. Для моделирования лазерного излучателя выбрана специальная библиотечная модель VCSEL, основанная так же, как и наша аналитическая модель, на одномодовых скоростных уравнениях. Однако в отличие от последней в ней дополнительно учитываются термодинамические эффекты, шумы, различные рекомбинационные модели, что делает ее более корректной.

С помощью описанной выше модели был проведен комплекс модельных экспериментов по исследованию характеристик ОЭРЧ при различных токах смещения, амплитудах и частотах модулирующего сигнала в границах области, обозначенной на рис. 4, целью эксперимента был выбор оптимального режима работы данного устройства. Пример результатов численного моделирования спектра на выходе исследуемого ОЭРЧ при частоте входного сигнала $f_m = 3$ ГГц представлен на рис. 6.

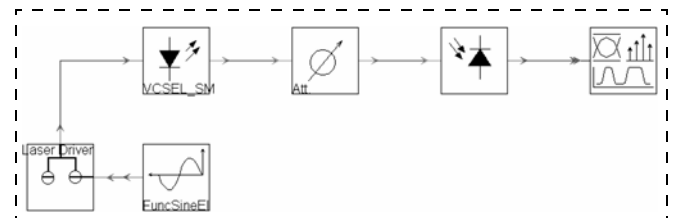


Рис. 5. Модель оптоэлектронного размножителя частот сигналов СВЧ диапазона

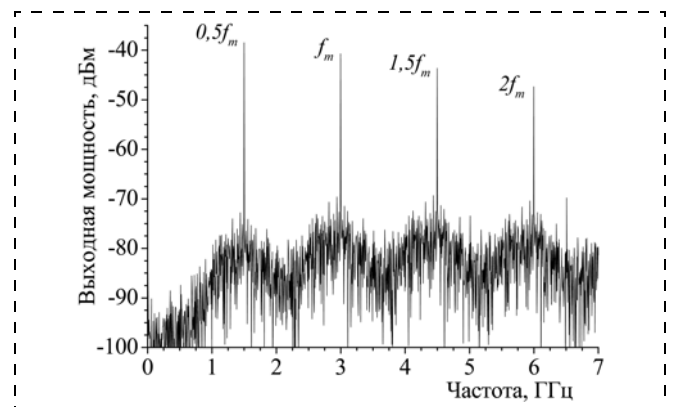


Рис. 6. Рассчитанная с помощью САПР *VPTransmission Maker* спектральная характеристика исследуемого оптоэлектронного размножителя частот СВЧ диапазона

Как следует из рисунка, в спектре помимо основной частоты и ее второй гармоники ($2f_m$) также наблюдаются отклики на частотах субгармоники ($0,5f_m$) и продукта смещения основной частоты и субгармоники ($1,5f_m$). Причем мощность сигнала субгармоники примерно на 3 дБ выше, а мощность на частоте $1,5f_m$ примерно на 3 дБ ниже мощности выходного сигнала основной частоты. Поскольку рассматриваемый ОЭРЧ представляет собой разновидность оптоэлектронного преобразователя частоты, то правомерно считать, что его ключевым параметром также являются потери преобразования. В показанной на рис. 6 реализации мощность входного (модулирующего) сигнала составляла около 0 дБм. Следовательно, потери двукратного понижающего преобразования получаются 38 дБ, а потери 1,5-кратного повышающего преобразования — около 44 дБ. Учитывая результаты других измерений в границах частот модуляции и амплитуд модулирующих токов, соответствующих рис. 4, можно обобщить: потери преобразования ОЭРЧ находятся в диапазоне 35...45 дБ.

Экспериментальное подтверждение

Для верификации результатов моделирования было проведено макетирование и экспериментальное исследование описанных выше оптоэлектронных преобразователя и размножителя частот СВЧ диапазона. Для обоих макетов использовался работающий в спектральном диапазоне в районе 1,3 мкм бескорпусной VCSEL сплавной конструкции производства фирмы *BeamExpress, SA, Швейцария*⁴ и фотодиодный модуль (ФДМ) *p-i-n*-типа с полосой 50 ГГц производства фирмы *u2t Photonics, Германия*⁵. Структурная схема измерительной установки соответствует схеме на рис. 1, ее общий вид представлен на рис. 7. В схеме соответствующие СВЧ сигналы подаются на модулирующий вход ПЛИ либо через сумматор мощности СМ, либо непосредственно. Постоянный ток смещения на VCSEL подводится с помощью коаксиального адаптера питания (АП). Для обеспечения эффективной электрической связи с входными СВЧ сигналами и оптической связи с ФДМ кристалл VCSEL устанавливается в специальную измерительную камеру, закрепленную на юстировочном столике. Детали конструкции макета ПЛИ описаны в работе [16]. Введенный в волокно модулирован-

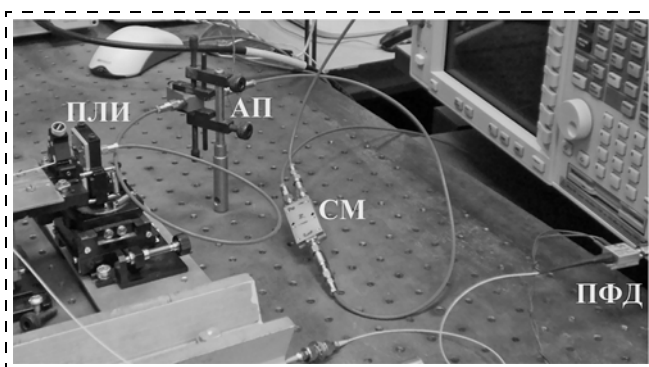


Рис. 7. Общий вид установки для измерения параметров макетов ОЭПЧ и ОЭРЧ

ОЭПЧ	Моделирование	36 дБ	Рис. 3
	Эксперимент	37 дБ	Рис. 8
ОЭРЧ	Моделирование	44 дБ	Рис. 6
	Эксперимент	46 дБ	Рис. 9

ный оптический сигнал детектируется в ПФД и поступает на вход радиочастотного анализатора спектра. В целях повышения информативности эксперимента показанный на рис. 1 полосовой фильтр не использовался.

Выходные спектры макетов ОЭПЧ и ОЭРЧ при аналогичных моделированию мощностях и частотах входных сигналов представлены соответственно на рис. 8 и 9.

Сравнение результатов моделирования и экспериментального исследования потерь преобразования макетов повышающих ОЭПЧ и ОЭРЧ приведено в таблице.

Близкое соответствие расчетных и экспериментальных данных свидетельствуют о корректности разработанных моделей ОЭПЧ и ОЭРЧ.

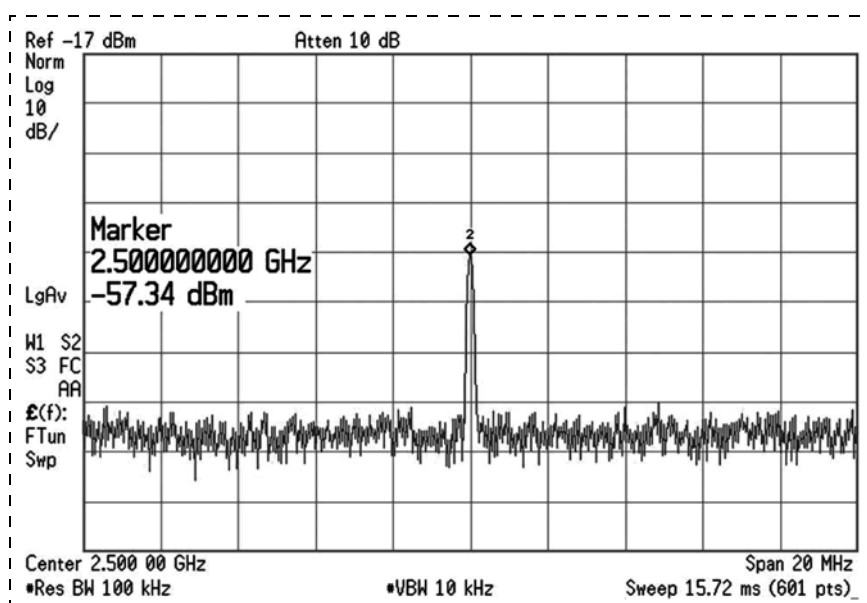


Рис. 8. Измеренный выходной спектр ОЭПЧ на VCSEL

⁴ www.beamexpress.com

⁵ www.u2t.com

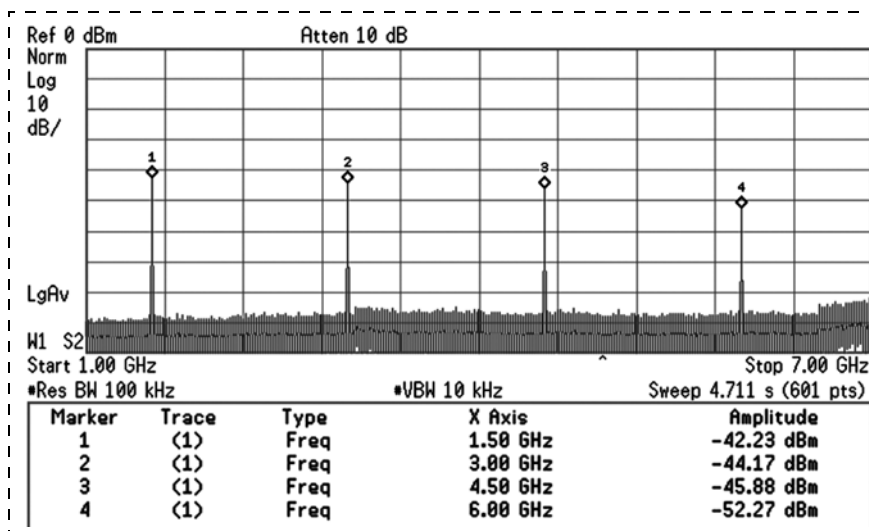


Рис. 9. Измеренный выходной спектр ОЭРЧ на VCSEL

Вариант применения оптоэлектронного размножителя частот

В отличие от преобразователя частоты практическое применение разработанного ОЭРЧ не очевидно, поэтому рассмотрим этот вопрос отдельно. Например, он может быть использован для упрощения схемы, улучшения экономических характеристик и упрощения требований к стабильности частоты местного гетеродинного сигнала в аппаратуре обратного канала базовой станции (БС) перспективных волоконно-эфирных телекоммуникационных систем, построенных на базе технологии RoF (*Radio-over-Fiber*) [17]. Пример реализации схемы обратного канала БС с использованием ОЭРЧ представлен на рис. 10 [17].

Основными элементами предложенной схемы обратного канала БС, в котором осуществляется преобразование радиосигнала от абонента сети в посылаемый на центральную станцию (ЦС) сигнал оптического диапазона, являются: антенна 1, принимающая от абонентского терминала модулированный СВЧ сигнал с несущей частотой 12 ГГц; смеситель с субгармонической накачкой [3] 2, выходной сигнал промежуточной частоты которого частотой $f_{\text{пч}} = 3$ ГГц фильтруется с помощью по-

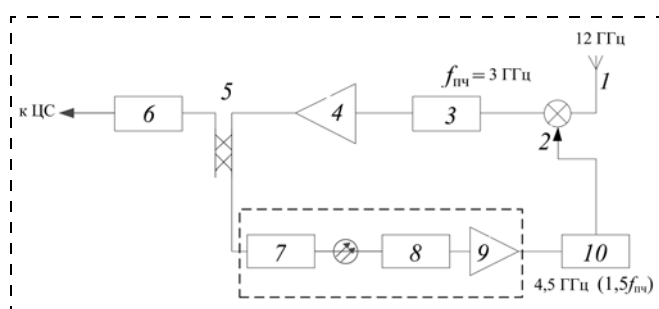


Рис. 10. Структурная схема построения обратного канала базовой станции системы класса RoF с использованием ОЭРЧ [17]

лосно-пропускающего фильтра 3, усиливается в усилителе промежуточных частот 4 и поступает на вход направленного ответвителя 5. Сигнал с отвода ответвителя 5 поступает на модулирующий вход служащего для ретрансляции оптического сигнала в направлении ЦС первого лазера 6, рабочая точка которого для уменьшения нелинейных искажений устанавливается в середине линейного участка его ватт-амперной характеристики. Сигнал с выхода ответвителя 5 поступает на вход ОЭРЧ, содержащий согласно приведенному выше описанию второй лазер 7, отрезок оптического волокна, фотодетектор 8 и полосовой усилитель 9, назначением которого является выделение и усиление

сигнала частотой $1,5f_{\text{пч}} = 4,5$ ГГц. Выходной сигнал ОЭРЧ поступает на вход настроенной на частоту 4,5 ГГц схемы восстановления несущей 10, которая представляет собой стандартный узел приемного тракта цифровой радиосистемы и обычно строится на базе схемы фазовой автоподстройки (ФАП). Восстановленный в схеме 10 сигнал несущей подается на гетеродинный вход смесителя 2, в котором согласно принципу его работы [3] смешение осуществляется на частоте, в 2 раза большей частоты гетеродина.

Заключение

В данной статье теоретически и экспериментально были исследованы варианты устройств преобразования сигналов СВЧ диапазона, построенных на базе оптоэлектронного подхода, точнее на принципах сверхвысокочастотной оптоэлектроники. Принципиальным преимуществом оптоэлектронного преобразователя частоты считается предельная широкополосность, недостижимая для традиционных транзисторных и диодных преобразователей частоты СВЧ диапазона. В рамках исследования ключевого параметра ОЭПЧ — потерь преобразования, проведено моделирование с помощью САПР *VPItransmission Maker*TM, наиболее экономичного варианта его схемы с использованием нелинейности характеристики электрооптического преобразователя частоты полупроводникового лазерного излучателя, в качестве которого использован перспективный поверхностно излучающий лазер с вертикальным каналом (VCSEL). В целях дальнейшего повышения экономичности ОЭПЧ был предложен и исследован его упрощенный вариант, названный оптоэлектронным размножителем частот (ОЭРЧ), в котором используется известный в лазерной физике эффект удвоения периода при модуляции полупроводникового лазера мощным си-

нусоидальным сигналом. Согласно результатам расчетов и близким к ним экспериментальным данным, полученным с помощью разработанных макетов ОЭПЧ и ОЭРЧ *S*-диапазона, потери повышающего преобразования ОЭПЧ составляют около 36 дБ, а ОЭРЧ — около 45 дБ. Таким образом, оптоэлектронный преобразователь частоты сигналов СВЧ диапазона пока имеет существенно большие потери преобразования по сравнению с традиционными устройствами на основе СВЧ транзисторов и диодов. Однако благодаря его широкополосности, которая определяется исключительно полосой модуляции лазера и фотодетектора, в ОЭПЧ отсутствует свойственный микроэлектронным преобразователям частоты СВЧ диапазона эффект увеличения потерь по мере повышения рабочей частоты. Достоинством ОЭПЧ также является универсальность применения вследствие одинаковых схем повышающего и понижающего преобразователей частоты. Все сказанное свидетельствует о перспективности рассмотренного оптоэлектронного подхода для построения радиоаппаратуры сверхширокополосных систем телекоммуникационного и радиолокационного назначений, например пассивной радиолокации, а также измерительной техники.

Настоящая работа выполнена в рамках проекта по аналитической ведомственной целевой программе Минобрнауки "Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2011 годы)".

Список литературы

1. Гассанов Л. Г., Липатов А. А. и др. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи. М.: Радио и связь, 1988. 288 с.
2. Gunnarsson S. E., Ferndahl M., Zirath H. A 60 GHz compact single-chip sub-harmonically pumped receiver MMIC // Proc. of the 2nd European Microwave Integrated Circuits Conference. 2007. P. 8—11.
3. Белкин М. Е., Белкин Л. М. Особенности построения резистивных смесителей диапазона крайне высоких частот // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2010. Вып. 1(224). С. 98—104.
4. Seeds A. J., Fice M. J., Pozzi F. et al. Photonic-Enabled Microwave and Terahertz Communication Systems // Proc. of

International Conference on Optical Fiber Communication, OFC 2009. OtuE6. P. 1—3.

5. Yao J. Microwave Photonics // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2009. Vol. 27, N 3. P. 314—335.

6. Robertson W. M. Optoelectronic Techniques for Microwave and Millimeter-Wave Engineering. Artech House, 1995. 244 p.

7. Constant S. B. et al. Low-cost all-optical up-conversion of digital radio signals using directly modulated 1550-nm emitting VCSEL // IEEE Technology Letters. 2008. Vol. 20, N 2. P. 120—122.

8. Lindsay A. C., Knight G. A., Winnall S. T. Photonic Mixers for Wide Bandwidth RF Receiver Applications // IEEE Transactions on MTT. 1995. Vol. 43, N 9. P. 2311—2317.

9. Polo V. et al. Millimetre-wave Optical Harmonic Mixer Employing a Single Mach-Zehnder Electro-Optic Modulator // Proc. of 28th European Microwave Conference, Amsterdam. 1998. P. 81—86.

10. Cabon B. et al. Photonic mixing in RF modulated optical link // In: Laser and Electro-Optic Symposium Proceedings, LEOS 2006. P. 408—409.

11. Malyshev S. A., Chizh A. I. P-i-n Photodiodes for Frequency Mixing in Radio-over-Fiber Systems // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2007. Vol. 25, N 11. P. 3236—3243.

12. Белкин Л. М., Белкин М. Е. Бесструктурная модель поверхностно излучающего лазера с полосой модуляции в СВЧ диапазоне // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 10. С. 9—17.

13. Белкин М. Е., Белкин Л. М. Исследование оптоэлектронного преобразователя частоты сигналов СВЧ диапазона // Материалы IX научно-технической конференции "Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА", Звенигород, 1—3 декабря 2010. — М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2010. С. 68—72.

14. Hemery E., Chusseau L., Lourtioz J.-M. Dynamic Behaviors of Semiconductor Lasers under Strong Sinusoidal Current Modulation: Modeling and Experiments at 1.3 μm // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1990. Vol. 26, N 4. P. 633—641.

15. Piprek J., Bowers J. E. Analog modulation of semiconductor lasers // In book: RF Photonic Technology in Optical Fiber Links / Ed. by W. S. C. Chang. Cambridge University Press, 2002. P. 57—79.

16. Белкин М. Е., Белкин Л. М. Исследование характеристики времени задержки включения поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 11. С. 51—54.

17. Способ построения базовой станции волоконно-эфирной телекоммуникационной системы распределенной структуры и модуль для его осуществления. — Заявка на изобретение / Авторы: Белкин М. Е., Белкин Л. М. Регистрационный № 2011128089. Приоритет от 11.07.2011 г.