

Создание радиофотонной аппаратуры на базе технологий оптической и сверхвысокочастотной электроники

М. Белкин, д.т.н.¹, М. Васильев, д.т.н.², Д. Ключник³, Е. Кузнецов, д.т.н.⁴

УДК 621.37 | ВАК 2.2.2

Рассматриваются общий принцип построения радиофотонной аппаратуры на базе оптоэлектронных и сверхвысокочастотных электронных узлов и электронная и фотонная компонентные базы, применяемые в радиофотонной аппаратуре. Приводятся схемы разработанных радиофотонных устройств, включая радиофотонную линию задержки СВЧ-сигналов, оптоэлектронный генератор СВЧ-сигналов и радиофотонный преобразователь частоты СВЧ-сигналов, которые могут найти эффективное применение в таких направлениях радиоэлектронной промышленности, как телекоммуникации, радиолокация, радиоэлектронное противодействие и измерительная техника, а также результаты их компьютерного моделирования с помощью моделей на основе физических эквивалентных схем в двух широко известных системах автоматизированного проектирования.

ОБЩИЙ ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ И РАЗРАБОТКИ РАДИОФОТОННОЙ АППАРАТУРЫ

Радиофотоника (Microwave photonics) – это появившееся в конце прошлого столетия междисциплинарное научно-техническое направление, объединяющее уже зрелые области СВЧ-электроники, а также активную (оптоэлектроники) и пассивную (пространственную, волоконную и интегральную) фотоники [1–7]. Это направление в последние 30 лет вызвало большой интерес в мире, выразившийся во множестве новых исследований и разработок, как со стороны научного сообщества, так и коммерческого сектора. Появляющиеся в последние годы новые применения радиофотонной аппаратуры (РФА) для информационных и коммуникационных сетей (ИКС) волоконно-беспроводной архитектуры, субтерагерцевых беспроводных систем, радаров и систем радиоэлектронного противодействия указывают на то, что радиофотонный подход продолжает развиваться, становясь предметом все более высокой важности. Как правило, радиофотонное устройство (РФУ) представляет собой пример тесной интеграции

фотоники и СВЧ-электроники для создания сложного функционального модуля в многоканальной аналоговой среде. В частности, радиофотонная технология открывает путь к сверхширокополосным характеристикам передачи при лучших массогабаритных, энергетических и экономических характеристиках по сравнению с традиционными чисто электронными ИКС [8].

Общий принцип построения РФА состоит в том, что входной либо выходной сигналы радиочастотного (РЧ) диапазона после предварительной обработки конвертируются в оптический диапазон, что выполняется посредством электрооптического преобразования (ЭОП). Далее модулированный оптический сигнал при помощи пространственных, волоконно-оптических либо интегрально-оптических узлов соответствующим образом коммутируется, фильтруется, усиливается, преобразуется вверх либо вниз по частоте, задерживается либо просто передается в узел, где осуществляется обратное оптико-электрическое преобразование (ОЭП) в РЧ-диапазон. В частности, в показанной на рис. 1 типичной схеме высокочастотной части СВЧ-приемника на основе РФУ между входным и выходным СВЧ-усилителями (СВЧУ) введен узел оптического диапазона, включающий ЭОП- и ОЭП-интерфейсы, между которыми расположены различные фотонные блоки для обработки сигналов в оптическом диапазоне, где черными стрелками показаны РЧ-соединения, а красными – оптические.

¹ РТУ МИРЭА, Научно-технологическая лаборатория «Радиофотонная СВЧ-электроника», в.н.с.

² ФГБУН ИОНХ РАН, зав. лаб., г.н.с.

³ РТУ МИРЭА, Научно-технологическая лаборатория «Радиофотонная СВЧ-электроника», м.н.с.

⁴ АО «НИИ «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха», генеральный директор.

Общая классификация компонентной базы, применяемой в любой РФА, приведена на рис. 2 [7].

Как следует из рисунка, у РФА отсутствует собственная компонентная база, а именно радиофотонная РЭА должна разрабатываться на основе традиционной электронной компонентной базы (ЭКБ), включающей активную ЭКБ (АЭКБ) и пассивную ЭКБ (ПЭКБ) с добавлением ЭОП, оптической обработки и ОЭП (см. рис. 1), а также на основе фотонной компонентной базы (ФКБ), включающей оптоэлектронную компонентную базу (ОЭКБ) и оптическую компонентную базу (ОКБ). В состав ОЭКБ (например, полупроводниковый лазерный диод, полупроводниковый фотодиод, оптический модулятор) входят только активные компоненты, то есть ее определяющим признаком, как и в ЭКБ, является наличие порта ввода источника постоянного тока. С другой стороны, в состав ОКБ входят как активные (например, волоконный либо полупроводниковый оптический усилитель), так и пассивные (например, оптические разветвитель, переключатель, фильтр, изолятор, циркулятор, волоконный либо интегральный световод и др.) компоненты.

Мировое развитие РФА показало, что процесс создания новой аппаратуры принципиально не отличается от аналогичного процесса создания современной РЭА, типичными последовательно выполняемыми этапами которого являются: разработка тактико-технического задания (ТТЗ), разработка детальной структурной схемы, компьютерное моделирование, предварительно подтверждающее возможность достижения с помощью предложенной схемы заявленных в ТТЗ ключевых параметров устройства, разработка конструкторской и технологической документации, изготовление макета устройства, экспериментальное подтверждение работоспособности разработанного устройства. Ниже на примерах выполненных конкретных разработок РФУ будут подробно рассмотрены особенности одного из основных этапов создания РФА: компьютерного моделирования.

ВЫБОР САПР ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РФА

В процессе моделирования разработчик новой РЭА на основе РФУ сталкивается с проблемой выбора подходящего программного инструмента. На сегодняшний день уровень разработки существующих оптических и оптоэлектронных систем автоматизированного проектирования (САПР), наиболее широко распространенными представителями которых являются программные среды VPI Photonics Design Suite (VPDS) фирмы VPI Photonics и OptiSystem фирмы Optiwave Design Software, значительно отстает от уровня разработки предназначенных для моделирования СВЧ-схем радиоэлектронных САПР (РЭ-САПР) на платформе Electronic Design Automation (EDA), как например Applied Wave Research Design Environment (AWRDE), которые совершенствовались в течение пос-

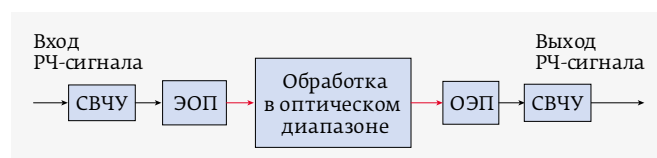


Рис. 1. Типичная схема высокочастотной части СВЧ-приемника на основе РФУ

ледних пяти десятилетий. Так наш опыт проектирования в вышеупомянутых оптоэлектронных САПР (ОЭ-САПР) наглядно показал, что они наиболее применимы для моделирования сложных аппаратуры и систем, а не отдельных устройств. В частности, исследуемые ниже оптические и оптоэлектронные компоненты представлены в них в виде готовых библиотечных моделей с весьма ограниченным набором параметров, необходимых для их разработки. Поэтому на основе этого программного обеспечения невозможно с высокой достоверностью провести детальное моделирование их функционирования. Например, невозможно корректно рассчитать передаточную характеристику в режиме большого сигнала с учетом вносимых нелинейных искажений, а также учесть влияние паразитных элементов входной/выходной схемы и конструкции кристалла и корпуса прибора в СВЧ-диапазоне.

Чтобы преодолеть этот недостаток, мы более 10 лет назад предложили другой подход с использованием приборно-ориентированной РЭ-САПР Cadence AWRDE [9], который впоследствии был существенно развит [10]. Его суть состоит в том, что оптимальное решение задачи моделирования компонентов РФА и устройств на их основе по критериям точности и времени принятия решения должно быть основано на рациональном сочетании структурных (в виде физической эквивалентной схемы, ФЭС) и бесструктурных моделей (когда отклик РФУ описывается в частотной, временной и пространственной областях на основе внешних входных и выходных характеристик) элементов схемы. Эффективность такого подхода, получившего название сквозного мультимасштабного проектирования, подтверждена экспериментально,

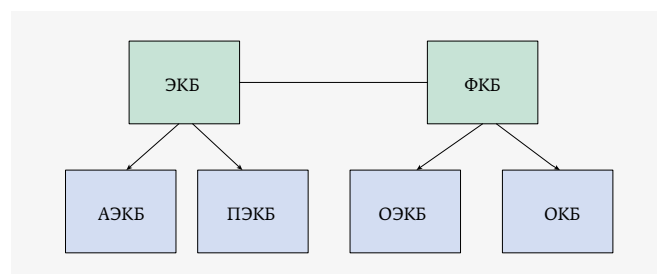


Рис. 2. Классификация компонентной базы РФА

Таблица 1. Сравнительные возможности и характеристики моделирования РФА в РЭ-САПР AWRDE и в ОЭ-САПР VPDS

№	Характеристика	Исследование	
		РЭ-САПР AWRDE	ОЭ-САПР VPDS
1	Объекты анализа	Схемные модули и узлы, 3D электромагнитный анализ	Схемные модули и узлы
Методы моделирования			
2	Линейные цепи	S-, Y-матрицы, эквивалентные схемы	S-матрицы
	Нелинейные цепи	Гармонический баланс (ALPAC), 3D планарный симулятор (AXIEM)	S-матрицы, совместное моделирование в пространственной и временной областях
Представление элементов и функции			
3	Активные компоненты ЭКБ	Многоспектральный гармонический баланс, HSPICE, ряды Volterra, на базе измеренных характеристик моделей	Идеальные модели, на базе измеренных характеристик моделей
	Активные компоненты ФКБ	Нет моделей	На базе скоростных уравнений, модели на базе передающих линий
	Пассивные компоненты ЭКБ	На базе сосредоточенных и распределенных моделей	Сосредоточенные идеальные модели
	Пассивные компоненты ФКБ	Нет моделей	Сосредоточенные идеальные модели
4	Возможности расчета радиофотонных цепей и линий передачи	С помощью однокнопочной операции	С помощью созданных пользователем сложных схем
5	Проектирование и анализ интегральных схем	Есть	Нет
6	Встроенные дизайн-комплекты основных производителей	Есть	Нет
7	Оптимизация параметров	Есть	Нет
8	Анализ чувствительности параметров	Есть	Нет
9	Расчет допусков	Есть	Нет
10	Статистическое проектирование	Есть	Нет
11	Программа оптимизации выхода годных изделий	Есть	Нет
12	Встроенная библиотека производителей	Есть	Нет

например, при моделировании оптоэлектронных устройств с СВЧ-полосой пропускания [11]. Кратко охарактеризуем оба класса САПР на примере AWRDE и VPDS. Сравнение их возможностей приведено в табл. 1.

В результате вышеприведенного сравнения можно сделать следующие выводы относительно моделирования РФА.

1. Платформа ОЭ-САПР наиболее применима для анализа сложных устройств и систем, а не их отдельных компонентов, которые представлены в виде параметризованных или формальных библиотечных моделей с очень ограниченным количеством параметров, необходимых

для корректного проектирования РФА. В частности, пассивные элементы РЭА, такие как волноводы, ответвители, резонаторы, резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и др., представляют собой только идеальные модели с сосредоточенными параметрами. Кроме того, расчет ключевых параметров схем и линий РФА, таких как коэффициент передачи в режиме большого сигнала, коэффициент шума, фазовый шум, интермодуляционные искажения, точки пересечения и т. д., возможен только на сложных испытательных стендах, созданных пользователем. На платформе же РЭ-САПР они рассчитываются «одним щелчком мыши».

2. С точки зрения разработчика, в платформе ОЭ-САПР отсутствует большое количество функций, весьма полезных для оценки проектируемого РПУ (см. пункты 5–12 в табл. 1).
3. Основным недостатком существующей платформы РЭ-САПР состоит в отсутствии моделей компонентов ФКБ (см. рис. 2 и пункт 3 табл. 1).
4. Наш опыт моделирования РФА с использованием Cadence AWRDE показал, что наиболее удобным способом введения в схему оптоэлектронных и оптических компонентов является представление их в виде структурной модели на базе ФЭС [12–16]. В этой схеме линейная часть построена на основе пассивных сосредоточенных или распределенных цепей, а нелинейная – использует источники (тока, напряжения, шума и т. д.), характеристики которых основаны на экспериментальных данных.

Таким образом, вышеприведенное сравнительное исследование общих возможностей, объектов и характеристик моделирования РФА в широко распространенных в настоящее время мировых ОЭ-САПР и РЭ-САПР убедительно показывает преимущество последнего типа САПР, единственный серьезный недостаток которой состоит в отсутствии библиотечных моделей активных и пассивных элементов ФКБ. Для устранения его нами были разработаны основные структурные и бесструктурные модели ФКБ, легко встраиваемые в стандартную РЭ-САПР AWRDE. Ниже их совместимость показана на примерах сравнительного моделирования основной активной и пассивной ФКБ, а также ряда ключевых устройств РФА, таких как схема задержки, генератор и преобразователь частоты СВЧ-сигнала.

ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РФА С ПОМОЩЬЮ САПР AWRDE И VPDS

Выяснив основные плюсы и минусы двух классов программных средств, с точки зрения проектирования РФА, приведем конкретные результаты сравнительного моделирования различных устройств и систем. Отметим,

что для проведения корректного сравнительного моделирования необходимо предварительно выполнить взаимную калибровку моделей оптоэлектронных и оптических компонентов. В этом плане поведенческие модели в AWRDE изначально более точны, поскольку основаны на экспериментальных данных. То есть калибровка заключается в подгонке параметров моделей VPDS так, чтобы получить близкие базовые характеристики в режимах малого и большого сигнала. Ниже мы представляем и обсуждаем результаты калибровки моделей ключевых оптоэлектронных и оптических компонентов, на основе которых в следующем подразделе будет проведен ряд модельных экспериментов для базовых РПУ.

Калибровка моделей оптических и оптоэлектронных компонентов

Полупроводниковый лазер

Варианты моделей полупроводникового лазерного излучателя (ПЛИ) в AWRDE в виде ФЭС предложены и подробно описаны, например в [12]. С другой стороны,

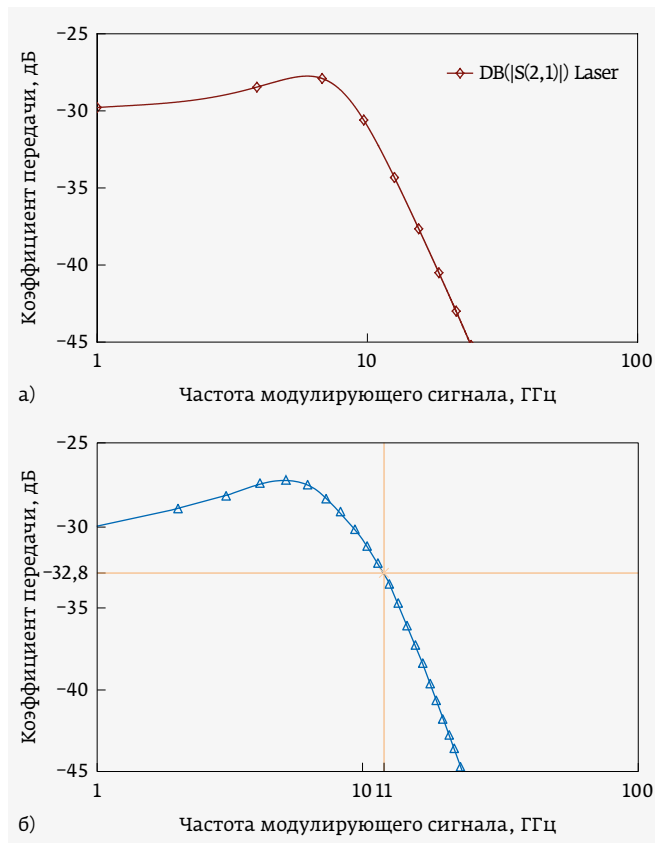


Рис. 3. Малосигнальная частотно-модуляционная характеристика модели ПЛИ: а – с помощью AWRDE, б – с помощью VPDS

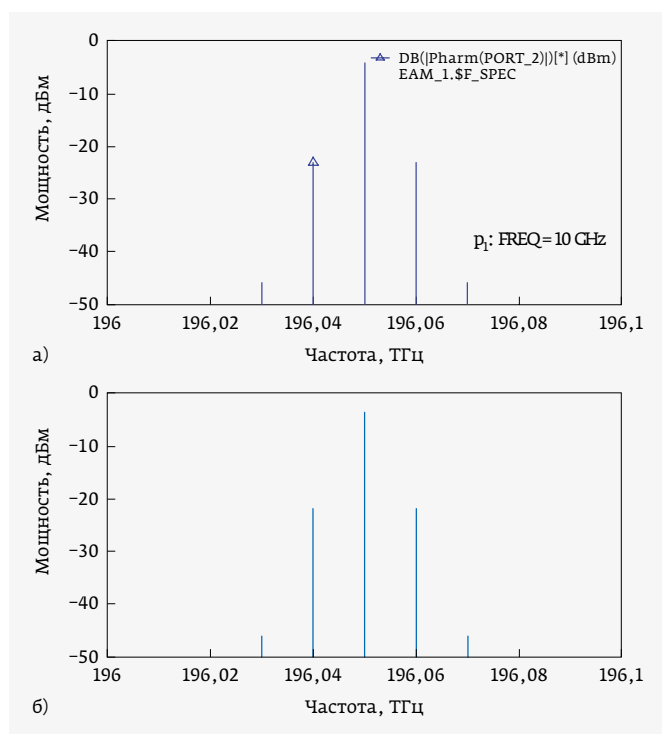


Рис. 4. Оптические спектры на выходе ЭАМ в режиме большого сигнала: а – с помощью AWRDE, б – с помощью VPDS

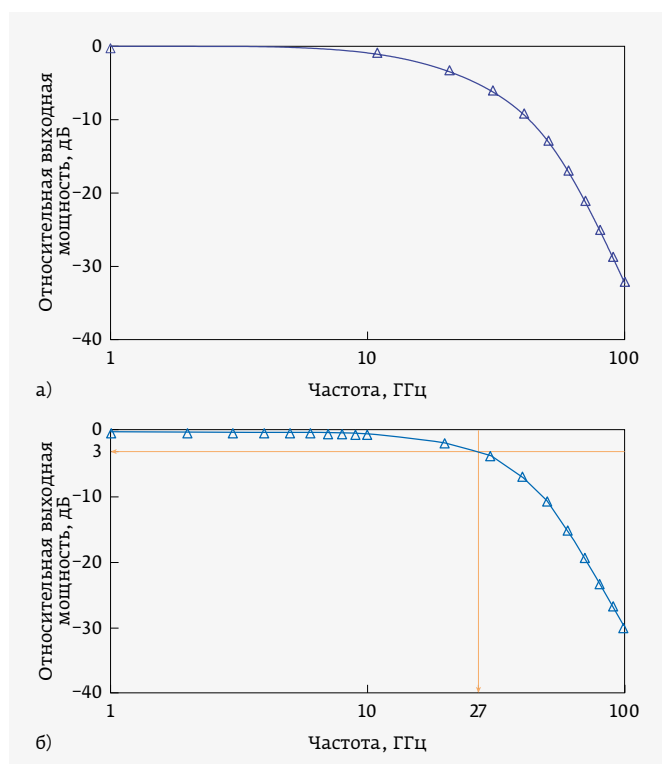


Рис. 5. Малосигнальная амплитудно-частотная характеристика модели pin-ФД: а – с помощью AWRDE, б – с помощью VPDS

в VPDS имеется более 10 библиотечных моделей ПЛИ, в основном основанных на линейных или нелинейных скоростных уравнениях, различающихся способом их представления и набором входных данных. На рис. 3 показан пример результатов моделирования частотной характеристики в режиме малого сигнала (модуль S21) с использованием модели в AWRDE с одной несущей и модели LaserRateEqSM.vtms в VPDS. Как следует из рисунка, оба графика для этого взаимно калиброванного оптоэлектронного компонента имеют схожий вид с типичными потерями преобразования около 30 дБ, пиком около 3 дБ, связанным с электронно-фотонным резонансом, и полосой непосредственной модуляции по уровню –3 дБ чуть больше 11 ГГц.

Электрооптический модулятор

Модель в AWRDE электрооптического модулятора интенсивности (ЭОМ), так называемого электроабсорбционного типа в виде ФЭС, предложена и подробно описана в [10]. С другой стороны, в VPDS имеются две библиотечные модели электроабсорбционного модулятора (ЭАМ), отличающиеся способом их представления и набором входных данных. На рис. 4 показан пример результатов моделирования оптических спектров в режиме большого сигнала с использованием AWRDE модели [10] и VPDS модели ModulatorEA_Polynomial.vtms. Как следует из рисунка, оба графика для этого взаимно калиброванного оптоэлектронного компонента имеют схожий вид при примерно одинаковых уровнях мощности основного сигнала и первых двух гармонических искажениях, вызванных нелинейностью передаточной характеристики модулятора.

Фотодиод pin-типа

Варианты AWRDE-модели pin-фотодиода (ФД) в виде ФЭС предложены и подробно описаны в [12, 13]. С другой стороны, в VPDS есть только одна унифицированная модель ФД, которая идеальна и обрабатывает как одномодовые, так и многомодовые оптические сигналы. На рис. 5 показан пример результатов моделирования полосы пропускания ФД в режиме малого сигнала с использованием разработанной AWRDE-модели и VPDS-модели Photodiode.vtms. Как следует из рисунка, оба графика для этого взаимно калиброванного оптоэлектронного компонента имеют схожий вид. Тем не менее, используя одни и те же исходные данные, была получена полоса пропускания по уровню –3 дБ чуть более 20 ГГц для модели AWRDE и 27 ГГц для модели VPDS.

Наиболее вероятная причина такого расхождения объясняется идеальностью модели VPDS, которая не учитывает влияние в СВЧ-диапазоне ни самого фотодиодного кристалла, ни паразитных элементов его выходной цепи. В частности, чтобы получить разумное снижение АЧХ

ИСПЫТАНИЯ

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КОНСТРУКЦИИ

ВИБРОСТЕНД EMIC



воспроизводимая
частота: 5-32 000 Гц



воспроизводимое
ускорение: до 29 g



Одним из важнейших этапов проектирования радиоэлектронных систем (РЭС) является прогнозирование ресурса электронных компонентов.

Ранее при проведении расчетов надежности РЭС использовали низшую резонансную частоту электронного компонента, либо системы. Однако вместе с миниатюризацией современной электронной базы резонансные частоты

сдвинулись в высокочастотную область. В связи с этим уменьшился эффект разрушающего действия изгибных деформаций и увеличился эффект многоциклового нагружки, который является не менее разрушительной для РЭС.

Таким образом уже на этапе проектирования узла важно проводить испытание по определению резонансных частот ЭКБ.



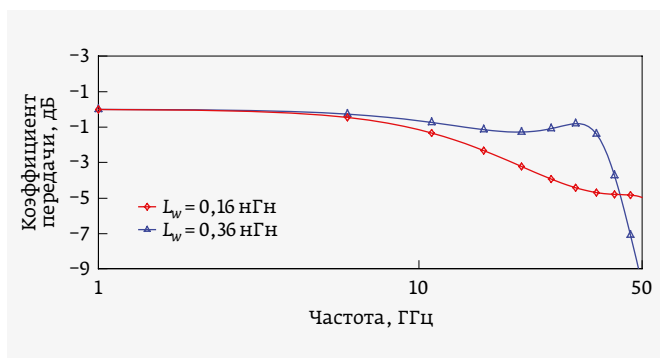


Рис. 6. Влияние соединительного провода между кристаллом ФД и контактной площадкой

на верхних частотах, на выходе модели ФД пришлось ввести библиотечную модель фильтра нижних частот. Эффект, относящийся к паразитным элементам схемы, наглядно поясняет рис. 6. Из графиков AWRDE следует, что разработчик может реализовать двукратное расширение полосы пропускания ФД по уровню -3 дБ (от 20 до 40 ГГц) за счет соответствующего подбора индуктивности соединительного провода L_w .

Оптическое волокно

В общем, при волновом подходе, где свет рассматривается как электромагнитная волна, любой оптический пассивный элемент, включая оптическое волокно (ОВ), может быть смоделирован как в РЭ-САПР, так и в ОЭ-САПР. А именно, в AWRDE сегмент оптического волокна определенной длины можно эквивалентно представить, используя, например, библиотечную модель физической линии передачи с потерями (TLINP). Однако при построении реалистичной модели ОВ необходимо учитывать целый комплекс дополнительных эффектов, таких как дисперсия, отражение, рассеяние, нелинейность, температура окружающей среды и т. д. (см. табл. 1), влияние которых может значительно ухудшить характеристику пропускания. AWRDE модель ОВ в виде ФЭС с учетом указанных выше ограничивающих факторов предложена и подробно описана в [10]. С другой стороны, в библиотеке VPDS имеется девять моделей многомодовых или одномодовых ОВ, отличающихся способом их представления, то есть какие ухудшающие факторы и какой набор входных данных учитываются. Пример результатов моделирования малосигнальной относительной фазо-частотной характеристики (аргумент S_{21}) с использованием упрощенной модели AWRDE [11] и модели UniversalFiberFwd.vtmg VPDS показан на рис. 7. Как следует из рисунка, оба графика для этого взаимно калиброванного оптического элемента имеют схожий вид и одинаковый наклон.

Исходные данные для проведения дальнейшего моделирования

Целью данного подраздела является обобщение результатов взаимной калибровки моделей оптических и оптоэлектронных компонентов таким образом, чтобы предоставить конкретные исходные данные для дальнейших исследований. Для этого в табл. 2 приведены типичные параметры четырех рассмотренных выше моделей: ПЛИ, ЭАМ, pin-ФД и ОВ, а также электронного усилителя, обычно используемого на выходе pin-ФД.

Примеры моделирования РФА

В этом подразделе объектом исследования являются конкретные устройства РФА, такие как схема задержки, генератор и преобразователь частоты СВЧ-сигнала. Инструментами сравнительного компьютерного моделирования являются широко известные коммерческие программы AWRDE и VPDS. В расчетах учитывается влияние ключевых источников искажений обрабатываемого СВЧ-сигнала, таких как вносимые шум и нелинейные искажения активных оптоэлектронных компонентов,

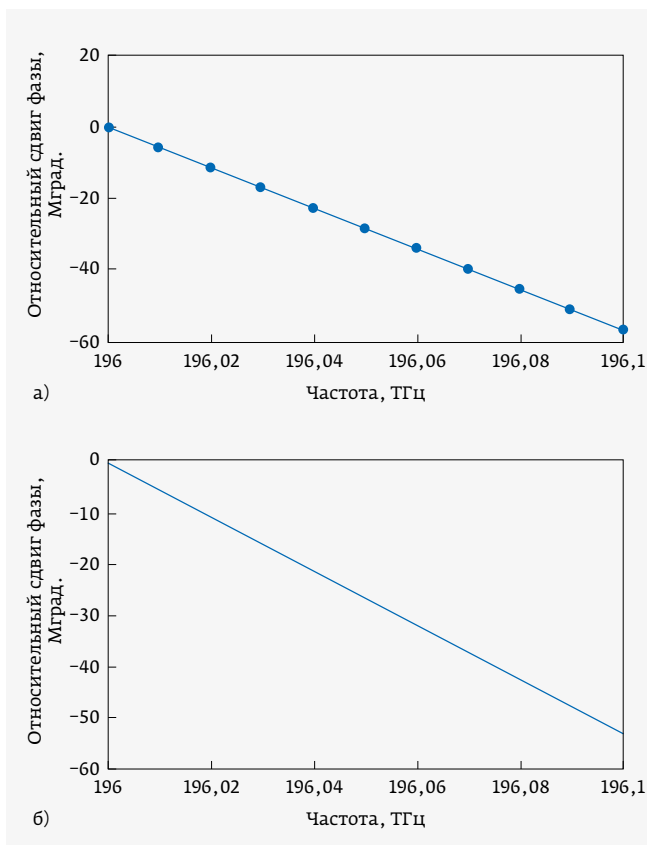


Рис. 7. Относительная фазо-частотная характеристика одномодового ОВ : а – с помощью AWRDE, б – с помощью VPDS

Таблица 2. Исходные данные для моделирования

Компонент	Параметр	Значение
ПЛИ	Рабочий ток, мА	40
	Средняя выходная мощность, мВт	8
	Спектральный диапазон, ТГц	С (191...196)
	Ширина линии излучения, МГц	1,5
	Относительный шум интенсивности, дБ/Гц	-150
	Пороговый ток, мА	8,5
	Крутизна ваттамперной характеристики, Вт/А	0,14
	Полоса непосредственной модуляции, ГГц	До 11
ЭАМ	Рабочее напряжение смещения, В	-0,6
	Коэффициент экстинкции, дБ	14
	Крутизна характеристики передачи, Вт/В	0,14
	Коэффициент уширения линии излучения (α)	1,0
	Полоса модуляции, ГГц	30
pin-ФД	Чувствительность, А/Вт	0,7
	Темновой ток, нА	100
	Уровень входной оптической мощности, мВт	<3
	Полоса пропускания, ГГц	До 30
СВЧ-усилитель	Коэффициент усиления, дБ	40
	Спектральная плотность шума, А/Гц ^{1/2}	20×10^{-12}
ОВ	Тип	SMF-28e+
	Длина, км	До 20
	Потери, дБ/км	0,2
	Задержка, нс/м	4,8
	Дисперсия, с/м ²	$17e^{-6}$
	Наклон характеристики дисперсии, с/м ³	80

а также хроматическая дисперсия оптического волокна. Параметры используемой компонентной базы основаны на данных табл. 2.

Моделирование радиопотонной схемы задержки СВЧ-сигналов

Волоконно-оптическая схема задержки (ВОСЗ) является одним из наиболее эффективных устройств радиопотоники [5]. На рис. 8 представлена концептуальная структурная схема тестируемой одноканальной радиопотонной

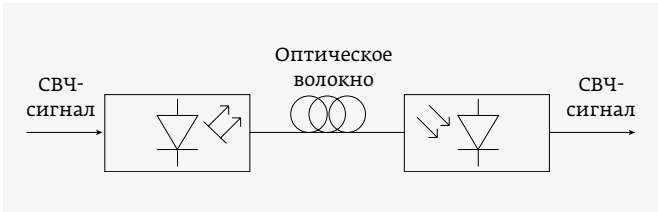


Рис. 8. Концептуальная структурная схема исследуемой РФ-ВОСЗ СВЧ-сигналов

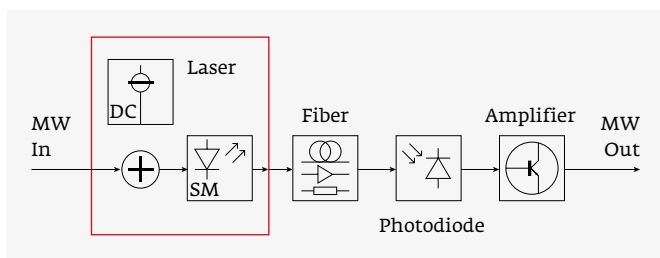


Рис. 9. VPDS-модель РФ-ВОСЗ СВЧ-сигналов

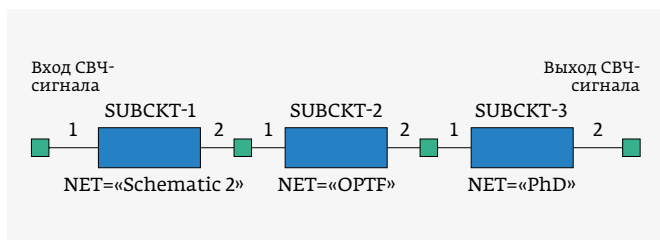


Рис. 10. AWRDE-модель РФ-ВОСЗ СВЧ-сигналов

ВОСЗ (РФ-ВОСЗ), включающая полупроводниковый лазер, непосредственно модулируемый входным СВЧ-сигналом, оптическое волокно, длина которого соответствует требуемому времени задержки, и фотодетектор, на выходе которого формируется задержанный СВЧ-сигнал. Ниже будут описаны модели и некоторые результаты сравнительного моделирования с использованием программных сред AWRDE и VPDS.

VPDS-Модель

Модель для имитационного эксперимента по оценке ключевых параметров качества тестируемой РФ-ВОСЗ при передаче непрерывных СВЧ-сигналов (MW In и MW Out) показана на рис. 9. Как видно, она содержит ту же схему, что и на рис. 8, и состоит из калиброванной в предыдущем подразделе библиотечной модели одномодового ПЛИ, так называемой галактической модели ОВ, включающей элемент задержки, и библиотечных моделей pin-ФД с добавлением СВЧ-усилителя, предназначенного для компенсации потерь при ЭОП и ОЭП.

AWRDE-Модель

Общая модель одноканальной РФ-ВОСЗ очень проста и содержит (рис. 10) каскадно соединенные подсхемы ПЛИ (SUBCKT-1), одномодового ОВ соответствующей длины (SUBCKT-2) и ФД (SUBCKT-3).

Результаты моделирования

Результаты моделирования групповой временной задержки (GTD) РФ-ВОСЗ, где частота СВЧ-сигнала меняется

в диапазоне 1–7 ГГц, а длина ОВ составляет 3 м, показана на рис. 11. Как следует из рисунка, благодаря широкополосности схемных элементов задержка практически не изменяется в столь широком диапазоне модулирующих частот (почти 3 октавы). Ее значение с высокой точностью совпадает для обеих моделей и близко к указанной в табл. 2 задержке в стандартном одномодовом волокне. Кроме того, на рис. 12 показаны характеристики тестируемой РФ-ВОСЗ в режиме передачи большого сигнала. Как видно из рисунка, точка компрессии входного СВЧ-сигнала по уровню 1 дБ находится вблизи –10 дБм для обеих моделей.

Выводы

Из проведенных модельных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- исследуемая радиофотонная схема задержки СВЧ-сигналов представляет собой очень простое устройство, которое, в отличие от электронного аналога, обеспечивает чрезвычайно широкую рабочую полосу пропускания и благодаря очень малому времени задержки в ЭОП и ОЭП, а также

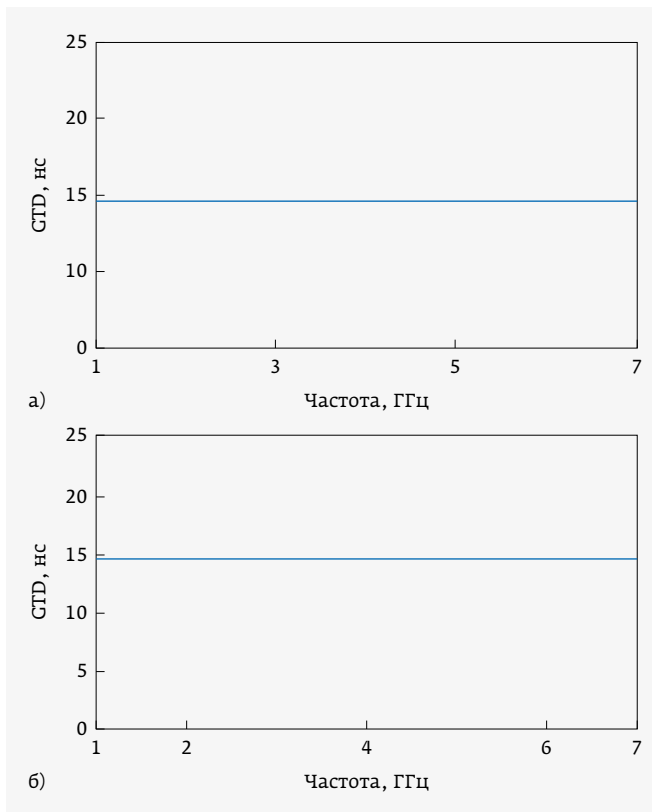


Рис. 11. Результаты моделирования радиофотонной схемы задержки СВЧ-сигналов: относительная фазочастотная характеристика: а – с помощью AWRDE; б – с помощью VPDS

KINGTECH

Высокотехнологичные
дисплеи для
зарядных станций
электромобилей
от компании
Kingtech



На правах рекламы

Решение с **высокой яркостью** Широкий диапазон **рабочей температуры**

Яркость: 1000 нит

Рабочая температура: $-30\sim 80^{\circ}\text{C}$

Защита от ультра-фиолета



Размер:
10,1 дюйма

Разрешение:
1280×800

Полный угол
обзора:
IPS/Full/All



Размер:
4,3 дюйма

Разрешение:
800×480

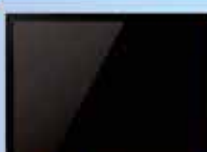
Полный угол
обзора:
IPS



Размер:
15,6 дюйма

Разрешение:
1920×1080

Полный угол
обзора:
IPS



Размер:
12,1 дюйма

Разрешение:
1024×768

Полный угол
обзора:
IPS



Размер:
5 дюймов

Разрешение:
800×480

Полный угол
обзора:
IPS



Komponenta

АО «Компонента» — официальный дистрибутор KINGTECH в России

☎ 8 495 150 2 150

🌐 www.komponenta.ru

✉ info@komponenta.ru

малым потерям и широкой полосе ОБ, широкий диапазон задержек от единиц наносекунд до сотен микросекунд.

- исследуемые компьютерные средства в обоих вариантах обеспечивают примерно одинаковую точность расчетов, что совпадает с реальным значением задержки в волокне [5]. Тем не менее, модель AWRDE проще и гибче в применении.

Моделирование оптоэлектронного генератора СВЧ-сигналов

Концептуальная блок-схема оптоэлектронного генератора (ОЭГ) СВЧ-сигнала, который является еще одним мировым примером применения РФА [17, 18], представлена на рис. 13. Как правило, он содержит две необходимые секции: оптическую и электронную. Оптическая секция включает в себя ПЛИ, ЭОМ, ОБ и ФД (на рис. 13 соответственно обозначены как: SLS, EOM, OF и PD). Электрическая секция включает в себя малошумящий СВЧУ (LNA),

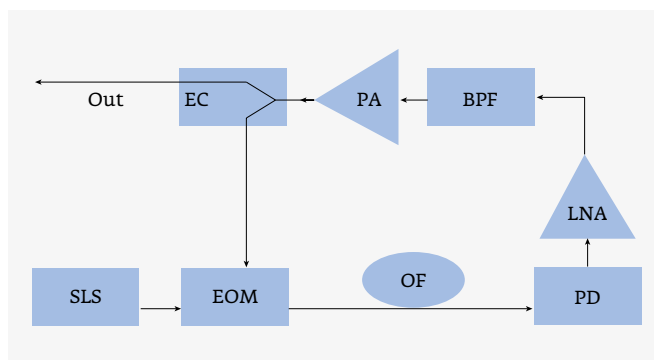


Рис. 13. Концептуальная блок-схема исследуемого оптоэлектронного генератора СВЧ-сигналов

полосовой фильтр (BPF), мощный СВЧУ (PA) и электронный разветвитель (на рис. 13 соответственно обозначены как: LNA, BPF, PA и EC).

VPDS-Модель

Следуя подходу, аналогичному нашему предыдущему модельному эксперименту, на рис. 14 показана VPDS-модель ОЭГ [19], разработанная на базе концептуальной схемы рис. 13. Важной особенностью этой модели является учет фазового шума ПЛИ.

Отметим, что в связи с отсутствием в данном программном средстве библиотечной модели ОБ, учитывающей задержку распространения оптического сигнала, модель ОБ на схеме заменена библиотечными моделями регулируемого оптического аттенюатора (ATT) и элемента задержки (τ) с идентичными параметрами.

AWRDE-Модель

Нелинейная модель исследуемого СВЧ ОЭГ, реализованная с помощью САПР AWRDE, представлена на рис. 15. Схема включает в себя цепочку реализованных в AWRDE подсистем (SUBCKT), отображающую (слева-направо): особенности работы ПЛИ в режимах малого (включая шумовые характеристики) и большого сигнала (см. табл. 2), задержку и потери ОБ, нелинейные функции оптического преобразования ФД (PhD), усиление и полосу пропускания предварительного СВЧУ (LNA), полосу пропускания и потери электронного полосно-пропускающего фильтра (BPF), частотные и амплитудные характеристики электронного усилителя мощности (AMP) и модель электронного разветвителя (SPLIT). Кроме того, имеются два встроенных программных элемента, упрощающие самовозбуждение схемы: DGDELAY, который моделирует идеальный, линейный, частотно-зависимый элемент цифровой временной задержки, и OSCAPROBE, который инициирует моделирование генератора в режиме большого сигнала.

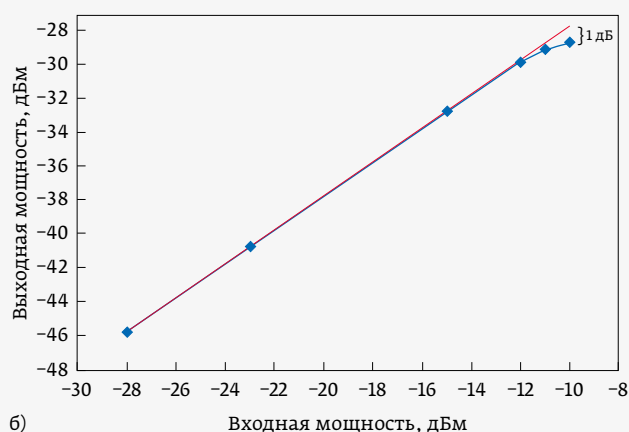
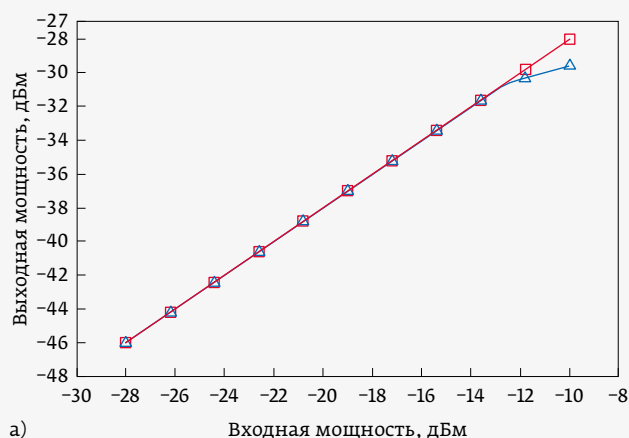


Рис. 12. Результаты моделирования радиофотонной схемы задержки СВЧ-сигналов: характеристика передачи в режиме большого сигнала

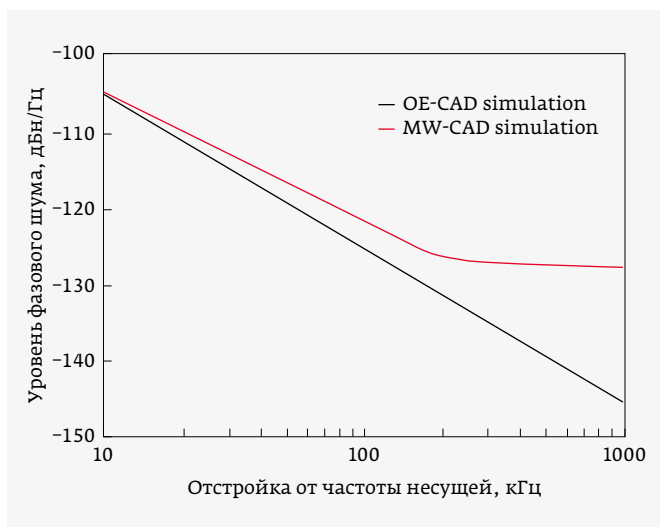


Рис. 16. Характеристики фазового шума ОЭГ СВЧ-сигналов

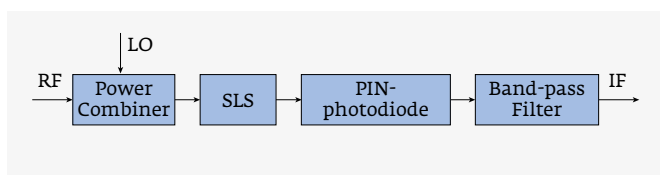


Рис. 17. Концептуальная блок-схема исследуемого РФПЧ

рис. 17 с введением электронного аттенюатора (Atten), служащего для регулировки уровня СВЧ-сигналов на входе ПЛИ.

AWRDE-модель

Следуя приведенной выше блок-схеме, на рис.19 показана AWRDE-модель РФПЧ СВЧ-сигналов. Схема включает

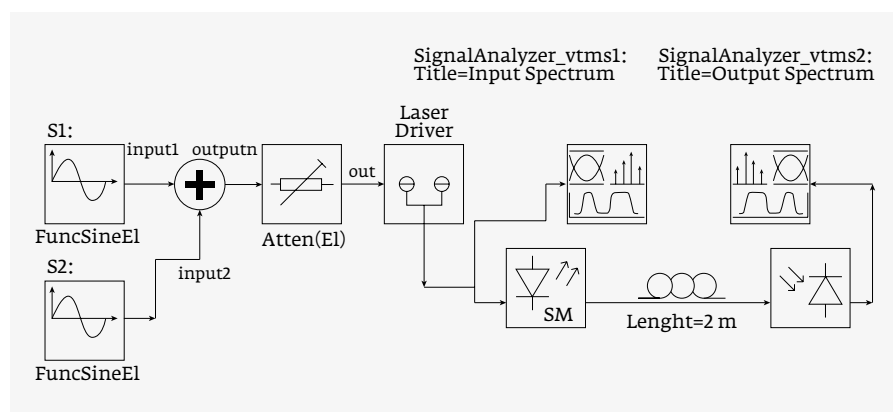


Рис. 18. VPDS-модель РФПЧ СВЧ-сигналов

в себя цепочку подсхем, представляющих (слева направо) реализованные с помощью AWRDE нелинейные модели ПЛИ (первые три секции) и pin-ФД (правые секции), исходные данные которых соответствуют табл. 2. Модель лазера представлена в виде физических эквивалентных схем линейных секций (S1 и S2) вместе с моделью нелинейной секции (A1), представляющей элемент библиотеки AWRDE LOOKUP, который реализует справочную таблицу, включая измеренную энергетическую характеристику. Правый участок цепочки представляет собой нелинейную модель фотодетектора (NLFD) также в виде физической эквивалентной схемы. Детали моделирования подробно описаны в [21].

Результаты моделирования

На рис. 20 показаны результаты модельного эксперимента, связанного с определением выходных спектров исследуемого РФПЧ с помощью VPDS и AWRDE. В обоих процессах входной СВЧ-сигнал имел мощность -20 дБм на частоте 1 ГГц, а сигнал гетеродина -6 дБм на частоте $1,5$ ГГц.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- применение мощного метода гармонического баланса, входящего в программное обеспечение AWRDE, как видно из рис. 20б, привело к мощности выходного сигнала около -55 дБм на частоте $2,5$ ГГц, то есть коэффициент преобразования составляет -35 дБ. Остальные пики на рисунке четко представляют полный выходной сигнал, спектр которого соответствует спектру стандартного СВЧ-смесителя;
- с другой стороны, рис. 20а хотя и показывает сопоставимый результат, относящийся к коэффициенту преобразования, но неверно отображает места и значения смешиваемых продуктов;
- результаты моделирования с использованием предложенной модели в AWRDE принципиально должны быть близко согласованы с экспериментальными данными, поскольку ее параметры построены на основе измеренных характеристик лазера и фотодиода.

Настоящая статья посвящена важной и критически актуальной в нашей стране проблеме развития отечественной радиоэлектронной промышленности путем создания перспективной радиоэлектронной аппаратуры двойного назначения с использованием новой радиопотонной

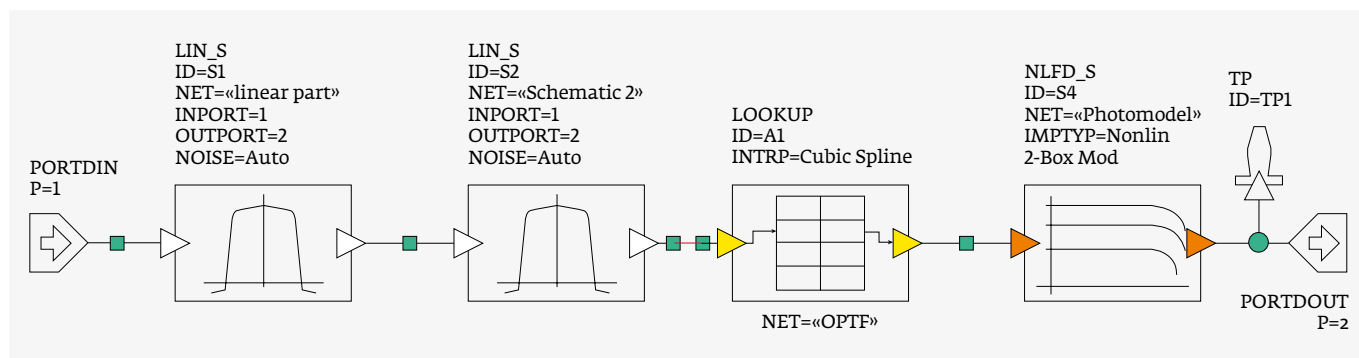


Рис. 19. AWRDE-модель РФПЧ СВЧ-сигналов в виде физической эквивалентной схемы

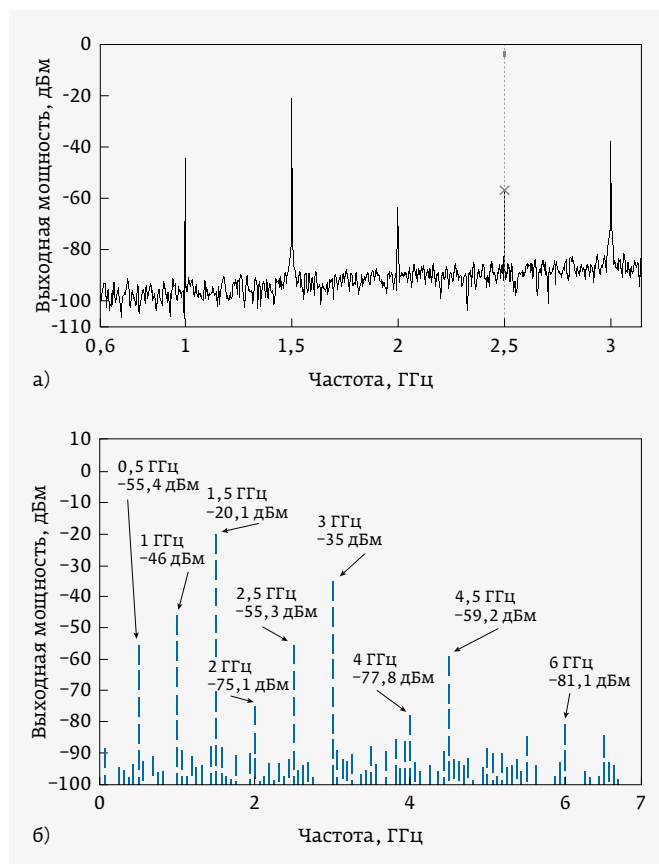


Рис. 20. Выходные спектры РФПЧ СВЧ-сигналов в режиме большого сигнала: а – с помощью VPDS; б – с помощью AWRDE

технологии на базе существующих и перспективных оптоэлектронных и сверхвысокочастотных электронных узлов. В данном направлении развития радиоэлектроники, появившемся в конце 70-годов прошлого столетия под названием Microwave Photonics, данная технология в последние 30 лет вызвала чрезвычайно большой

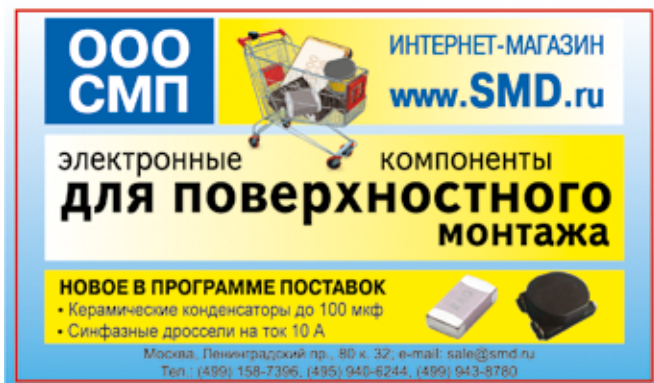
интерес в мире, что выразилось во множестве новых исследований и разработок, как со стороны научного сообщества, так и коммерческого сектора. Появляющиеся в последние годы новые применения радиофотонной аппаратуры для информационно-телекоммуникационных сетей волоконно-беспроводной архитектуры, субтерагерцевых беспроводных систем, радаров и систем радиоэлектронного противодействия указывают на то, что радиофотонный подход продолжает развиваться, становясь предметом все более высокой важности. Следуя этому, выше рассмотрены: общий принцип построения и разработки радиофотонной аппаратуры, вопросы оптимального выбора системы автоматизированного проектирования (САПР) для моделирования радиофотонной аппаратуры и примеры моделирования трех конкретных радиофотонных устройств, включая радиофотонную схему задержки СВЧ-сигналов, оптоэлектронный генератор СВЧ-сигналов и радиофотонный преобразователь частоты СВЧ-сигналов, с помощью оптоэлектронной САПР VPI Photonics Design Suite и радиоэлектронной САПР Cadence AWRDE. Полученные результаты четко показали преимущества использования последней САПР при условии нашей доработки путем введения в ее библиотеку моделей ключевых активных оптоэлектронных и пассивных оптических компонентов, построенных на основе физической эквивалентной схемы.

Работа поддержана Минобрнауки РФ в рамках гранта в форме субсидии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Seeds A.J., Williams K.J. Microwave Photonics // IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology. 2006. V. 24. No. 12. PP. 4628–4641.
2. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // Nature Photonics, 2007. Vol. 1. No. 1. PP. 319–330.
3. Yao J. Microwave Photonics // IEEE J. of Lightwave Technol. 2009. Vol. 27. No. 3. PP. 314–335.

4. **Белкин М.Е., Сигов А.С.** Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 8. С. 901–914.
5. **Урик В.Д., МакКинни Д.Д., Вилльямс К.Д.** Основы микроволновой фотоники. / Пер. с англ. под ред. С.Ф. Боева, А.С. Сигова. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. 376 с.
6. **Белкин М.Е., Сигов А.С., Кудж С.А.** Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиوفотонной технологии // Российский технологический журнал. 2016. № 1 (10). С. 4–20.
7. **Белкин М.Е.** Радиوفотонный подход в разработке нового поколения СВЧ радиоэлектронных устройств и систем // Нано- и Микросистемная техника. 2023. Т. 25. № 4. С. 195–200.
8. **Paolella A.C., De Salvo R., Middleton C., Logan C.** Direction in radio frequency photonic systems // In Proceedings of the IEEE 16th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON 2015), Cocoa Beach, FL, USA, pp. 1–6.
9. **Belkin M.E., Belkin L., Sigov A.S., Iakovlev V., Suruceanu G., and Kapon E.** Performances of Microwave-Band Analog Signal Transmission using Wafer-Fused Long Wavelength VCSELs // IEEE Photonics Technology Letters. 2011. Vol. 23. No. 20. PP. 1463–1465.
10. **Belkin M.E., Golovin V., Tyschuk Y., Vasil'ev M., and Sigov A.S.:** Computer-Aided Design of Microwave-Photonics-based RF Circuits and Systems. Chapter 4 in book IntechOpen RF Systems, Circuits and Components. 2018. PP. 61–81. From: <https://www.intechopen.com/books/rf-systems-circuits-and-components/computer-aided-design-of-microwave-photonics-based-rf-circuits-and-systems>.
11. **Belkin M.E., Golovin V., Tyschuk Y. and Sigov A.S.** A simulation technique for designing next-generation information and communication systems based on off-the-shelf microwave electronics computer tool // Int. J. Simulation and Process Modelling. 2018. Vol. 13. No. 3. PP. 238–254.
12. **Белкин М.Е.** Моделирование оптоэлектронной элементной базы многоканальной аналоговой волоконно-оптической системы // Научный вестник МИРЭА. 2007. № 1 (2). С. 40–49.
13. **Белкин М.Е., Белкин Л.М.** Разработка нелинейной модели полупроводникового фотодетектора с полосой в СВЧ-диапазоне // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. Серия: Научная сессия, посвященная дню радио. Выпуск LXV. М., 2010. С. 162–164.
14. **Белкин М.Е., Головин В.В., Тыщук Ю.Н., Кудж С.А., Сигов А.С.** Моделирование оптических модуляторов интенсивности излучения на базе интерферометра Маха-Цандера при помощи программного средства расчета СВЧ-цепей NI AWR Design Environment // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 5. С. 3–16.
15. **Белкин М.Е., Головин В. В., Тыщук Ю.Н.** Модель волоконно-оптической линии в AWRDE для систем с многоволновым уплотнением. 28-я Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КРЫМИКО-2018). Материалы конференции, с. 1542–1548.
16. **Belkin M.E., Golovin V., Tyschuk Y., Sigov A.S.** Modeling multi-core fiber-optic waveguide // European Modeling and Simulation Symposium, Proceedings EMSS2018, Budapest, Sept., 17–19.
17. **Yao X.S.** Opto-electronic Oscillators // In book: RF Photonic Technology in Optical Fiber Links. / Ed. by W. S. C. Chang. – Cambridge University Press. 2002. PP. 255–292.
18. **Белкин М.Е., Лопарев А.В.** Оптоэлектронный генератор – первое практическое устройство СВЧ-оптоэлектроники. ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 6. С. 62–70.
19. **Belkin, M.E. and Golovin V.** Microwave Electronic CAD Modeling of Microwave-Band Optoelectronic Oscillator Based on Long Wavelength VCSEL. In: Proceedings of the International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2015); 2–4 November 2015; Tel Aviv, Israel. PP. 1–3.
20. **Belkin M.E., Belkin L.M., Loparev A.V., Iakovlev V., Kapon E., Suruceanu G.** Microwave-Band Optoelectronic Frequency Converters Based on Long Wavelength VCSELs // IEEE COMCAS. Tel Aviv, Nov. 2011. PP. 1–6.
21. **Belkin M.E., Tyschuk Y.** Microwave Electronic CAD Modeling of Microwave Photonic Devices Based on LW-VCSEL Mixing. In: Proceedings of the II International Conference on Microwave and Photonics. (ICMAP 2015); 11–13 December 2015; Dhanbad, Bihar India. PP. 1–3.





22–24 октября 2024

Москва, МВЦ «Крокус Экспо»

21-я Международная выставка испытательного
и контрольно-измерительного оборудования



Забронируйте стенд
testing-control.ru



Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+7 (495) 252 11 07
control@mvk.ru