РАДИОФОТОННЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ: измерения параметров и характеризация ВЧ/СВЧ-компонентов

В.Мораренко, инженер компании Keysight Technologies

В последние десятилетия в сфере сверхширокополосных систем передач наблюдается замещение электронных систем на фотонные. Отсутствие заряда и массы наделяет фотон свойствами, невозможными для электрона, в результате чего фотонные системы не подвержены внешним электромагнитным полям и обладают гораздо большей, в сравнении с электронными, дальностью передачи и шириной занимаемой полосы сигнала.

Что такое радиофотоника

Преимущества, уже реализованные на базе фотоники в сфере телекоммуникаций, дают право говорить о новом отраслевом направлении – радиофотонике, возникшей из слияния радиоэлектроники, интегральной и волновой оптики, СВЧ-оптоэлектроники и ряда других областей науки и промышленного производства.

Другими словами, радиофотоника – новое научно-техническое и технологическое направление, изучающее взаимодействие оптического излучения и СВЧ-радиочастотного сигнала в задачах приема, передачи и обработки информации. Направление связано с использованием методов и средств фотоники совместно с радиоэлектронными элементами, узлами и устройствами радиодиапазонов.

Радиофотоника нашла свое применение в таких областях, как передача с минимальными потерями сигналов спутниковой связи, распределение сигналов на удаленные антенны, линии передачи СВЧ-сигналов внутри крупных объектов, системы радиоэлектронной борьбы (РЭБ), оптические линии задержки и обработки сигналов, системы калибровки радаров и РЛС, фазированные антенные решетки (ФАР).

В английской литературе данное направление получило название radio over fiber (ROF) или radio over glass (ROG). Суть этих технологий заключается в передаче радиосигнала (на соответствующей несущей, с определенным форматом модуляции, или импульсным сигналом, с ЛЧМ и т.д.) по оптоволоконному кабелю с помощью двух ключевых элементов: передатчика (TX – transmitter) и приемника (RX – receiver). В основном качество такой системы и определяется этими главными (активными) электрооптическим и оптоэлектронным компонентами.

Основные преимущества радиофотонных систем: сверхнизкие потери и дисперсия оптического волокна (менее 0,2 дБ/км на 1550 нм, оптическая несущая ~200 ТГц); сверхширокополосность (доступная полоса частот оптического волокна ~50 ТГц, полоса частот современных фотодиодов и модуляторов до 100 ГГц и выше); низкий уровень фазовых шумов (процесс прямого оптического детектирования с помощью фотодиода не восприимчив к фазе оптического

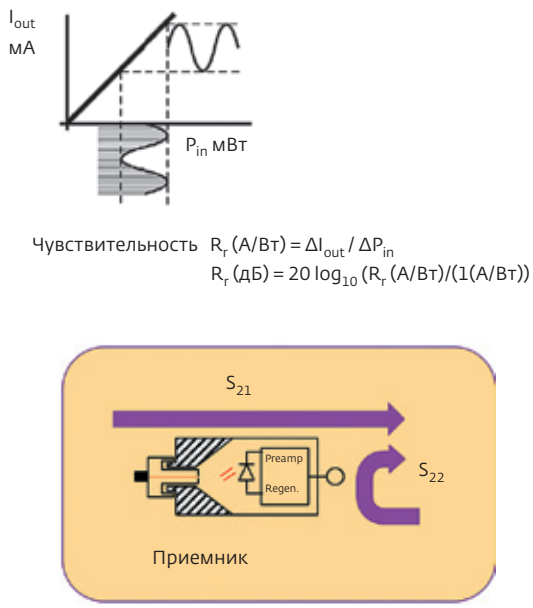

Рис.1. Определение характеристик оптоэлектронных устройств

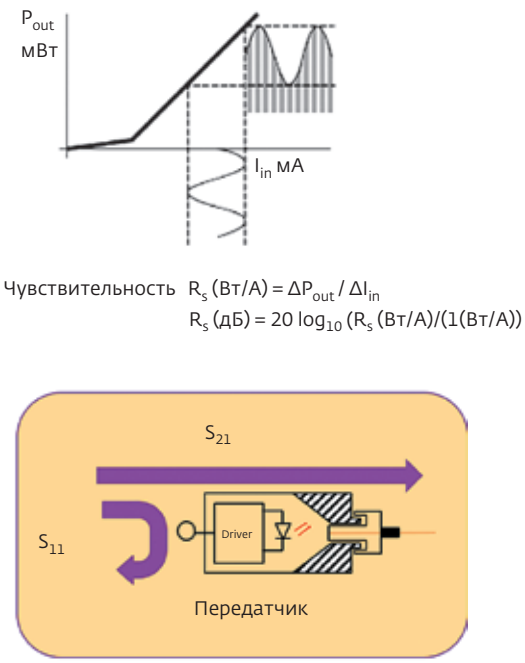

Рис.2. Определение характеристик электрооптических устройств

излучения); высокая фазовая стабильность оптического волокна; невосприимчивость к электромагнитным помехам, не создает помехи; гальваническая развязка фотонных схем; малая масса и размеры оптического волокна; механическая гибкость оптического волокна (облегчает конструктивное исполнение).

Типы компонентов радиофотонных систем

Итак, основные компоненты радиофотонной системы – передатчик и приемник. Конечно, это общие названия. На практике передатчик является более сложным устройством, содержащим источник лазерного излучения и модулятор, не считая электронные схемы управления, например, микропроцессор. В качестве приемников используются различные фотодиоды или фотодетекторы, а при необходимости детектирования фазы оптического сигнала – когерентные фотодетекторы со смешением с опорным сигналом.

Конечно, роль пассивных оптических компонентов также высока, и использование качественных оптоволоконных кабелей – залог передачи сигнала с минимальными потерями. Для некоторых типов сигналов и форматов модуляции критичным становится сохранение состояния поляризации по всей длине волокна.

Немало зарубежных компаний предлагают сегодня радиочастотные волоконно-оптические компоненты различного назначения и различных принципов действия. Сейчас важным направлением развития и сохранения обороноспособности и научного потенциала России является разработка отечественной компонентной базы. Именно при разработках, исследованиях, опытно-конструкторских работах и производстве компоненты необходимо характеризовать и получать полную информацию в широком рабочем частотном диапазоне.

Метод измерения параметров компонентов – "оптические" S-параметры

Как было сказано выше, компоненты радиофотонных систем необходимо характеризовать и получать полную информацию в широком рабочем частотном диапазоне. Такую информацию несут, как известно, S-параметры для ВЧ/

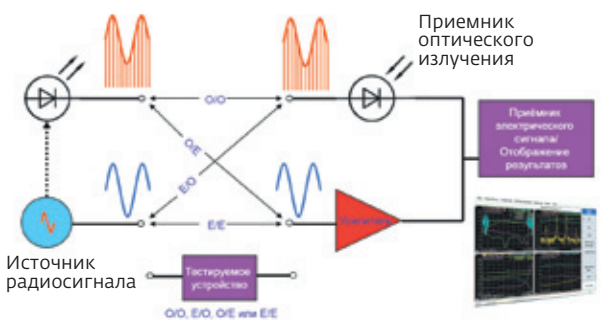

Рис.3. Концептуальная диаграмма анализатора оптических компонентов

Рис.4. Структура анализатора оптических компонентов

СВЧ-устройств. В оптических системах передачи данных и связи активные компоненты также можно охарактеризовать в зависимости от соотношений между выходным и входным сигналом и типа этих сигналов. Для оптических компонентов S-параметры несут определенный смысл, отличающийся от S-параметров ВЧ/СВЧ-устройств. Например, частота отсечки модулирующего сигнала, абсолютная чувствительность, потери на отражение и т.д. К тому же невозможно измерение параметра S_{12}, ввиду невозможности обратного преобразования сигнала в таких компонентах.

Итак, измерение параметров оптоэлектронного приемника состоит из определения отношения силы тока выходного электрического модулированного сигнала к уровню мощности входного оптического модулирующего сигнала. Чувствительность оптоэлектронных устройств описывает, как изменение уровня оптической мощности приводит к изменению электрического тока. Графически это показано на рис.1.

Прибор должен измерять уровень мощности входного оптического модулирующего сигнала, силу тока выходного электрического модулированного сигнала и отображать отношение этих двух величин в А/Вт.

Процесс измерения параметров электрооптических устройств во многом аналогичен измерению оптоэлектронных устройств. Анализ электрооптического передатчика включает измерение силы тока входного электрического сигнала модуляции и уровня мощности выходного оптического модулированного сигнала. Крутизна характеристики или чувствительность (Responsivity Rs (W/A)) используется для описания того, как изменение силы тока на входе приводит к изменению уровня мощности на выходе. Графически это показано на рис.2.

Прибор должен измерять силу тока входного электрического модулирующего сигнала, уровень мощности выходного оптического модулированного сигнала и отображать отношение этих двух величин в Вт/А в линейном масштабе или децибелах.

Таким образом, используя приведенные методы измерений параметров и характеризации для тестирования компонентов систем передачи радиосигнала по оптическому каналу, а именно электрооптических, оптоэлектронных устройств, компанией Keysight Technologies предложен инновационный прибор – анализатор оптических компонентов (lightwave component analyzer – LCA), построенный на базе векторного анализатора цепей. Концептуальная диаграмма метода анализа оптических компонентов, реализованного на базе векторного анализатора цепей и преобразования радиосигнала в оптический и наоборот, представлена на рис.3.

Модели анализаторов оптических компонентов компании Keysight Technologies

Модель	Частотные диапазоны	Параметры оптической приставки	Модель векторного анализатора цепей, на базе которого строится прибор
N4374B	4,5 ГГц	Одномодовое волокно, 1310, 1550 нм или внешний источник излучения	ENA-C, только 2 порта
N4376D	26,5 ГГц	Многомодовое волокно, 850 нм	PNA, 2 или 4 порта
N4375D	26,5 ГГц	Одномодовое волокно, 1310, 1550 нм или внешний источник излучения	PNA, 2 или 4 порта
N4373D	43,5 50 67 ГГц	Одномодовое волокно, 1310, 1550 нм или внешний источник излучения (либо многомодовое 850 нм по специальному запросу)	PNA, 2 или 4 порта

Концептуальная схема реализуется с помощью так называемой "оптической" приставки (рис.4), в которой происходит преобразование, то есть в ней интегрированы оптический передатчик и оптический приемник, а система фазостабильных кабелей используется для передачи сигналов на векторный анализатор цепей, откалиброванный в плоскости входных каналов последнего. Такое оборудование позволяет определять "оптические" S-параметры в диапазоне частот до 67 ГГц.

Сейчас линейка анализаторов оптических компонентов компании Keysight Technologies состоит из четырех приборов: N4373D, N4375D, N4376D, N4374B (см. таблицу). В каждой модели опционально можно выбрать необходимый частотный диапазон, конфигурацию векторного анализатора цепей, конфигурацию оптической приставки (например, использование встроенного лазерного излучателя или внешнего – на пользовательской длине волны).

Управление прибором осуществляется с помощью надстройки к стандартному пользовательскому интерфейсу анализаторов цепей Keysight. С помощью данной надстройки выбирается длина волны источника излучения, мощность оптического излучения, рабочая точка встроенного лазерного излучателя. Таким образом, работа с прибором такого высокого класса интуитивно понятна и не составляет труда, в том числе процесс калибровки и коррекции предыскажений (рис.5).

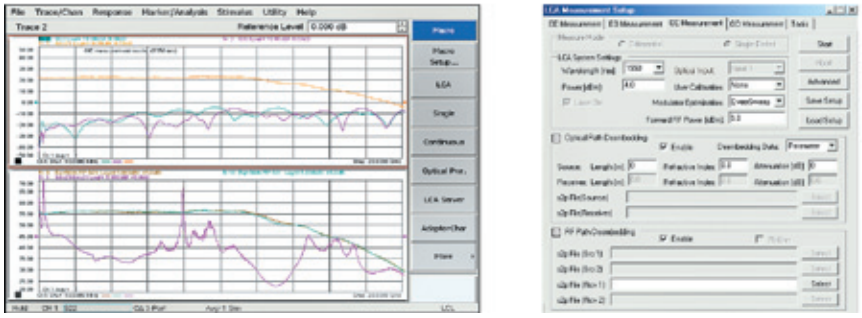

Рис.5. Интуитивно понятный пользовательский интерфейс анализатора оптических компонентов

Так же анализатор оптических компонентов (при использовании 4-портовой конфигурации анализатора цепей) позволяет проводить балансные измерения устройств с дифференциальными входами или выходами (рис.6). Как и тестирование ВЧ/СВЧ-устройств, радиофотонные компоненты можно тестировать на подложке или плате с помощью зондовой станции и специальных пробников (рис.7).

Еще одним преимуществом метода

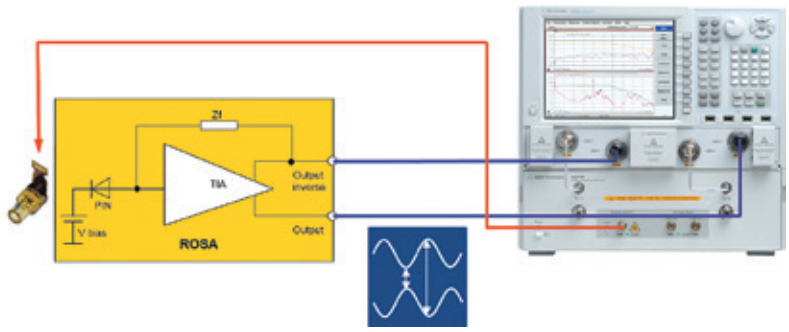

Рис.6. Измерения балансных устройств на примере приемника типа POSA

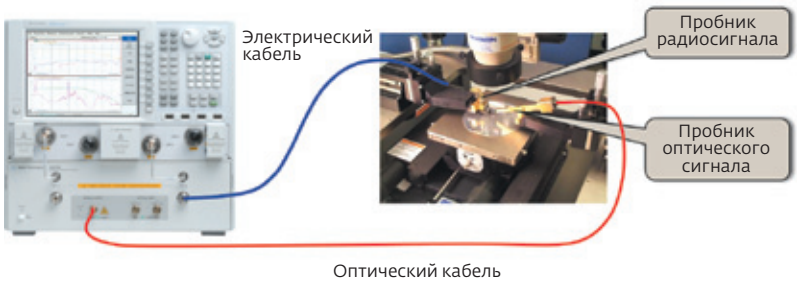

Рис.7. Тестирование оптических компонентов на подложке или плате

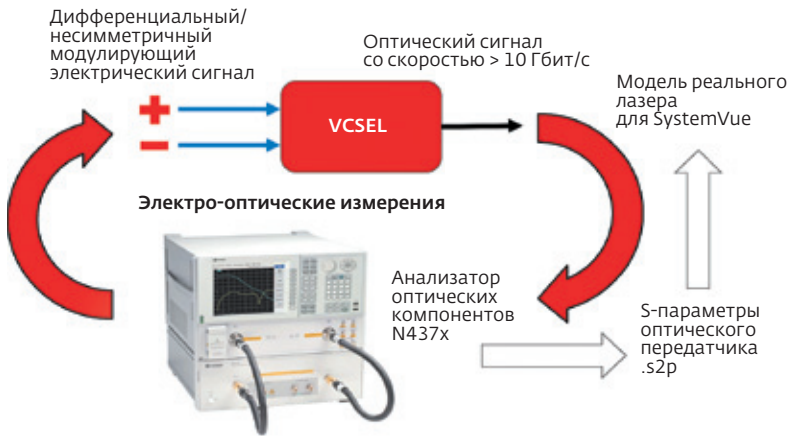

Рис.8. Экстракция измеренных параметров в САПР на примере лазерного передатчика типа VCSEL

характеризации оптоэлектронных и электрооптических компонентов ВЧ/СВЧ в частотной области с помощью S-параметров является их интеграция с системами автоматизированного проектирования (САПР). Так, для моделирования радиофотонной системы можно использовать измеренные на анализаторе оптических компонентов S-параметры передатчика или приемника, загрузить их в соответствующую модель, например, в САПР для моделирования на системном уровне Keysight SystemVue, и модель системы построить на основе реальных параметров, обеспечивая этим полное соответствие и правдоподобность модели (рис.8).

Таким образом, предложен метод измерений параметров и характеризации оптоэлектронных и электрооптических компонентов ВЧ/СВЧ в частотном диапазоне до 67 ГГц и решение для его реализации на базе векторных анализаторов цепей компании Keysight серий ENA и PNA.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Derickson D.** Fiber optic test and measurement. ISBN 0-13-534330-5. Hewlett-Packard Professional books. – New Jersey: Prentice Hall PTR, 1998.
2. **Xavier N.F.** Radio over Fiber for Wireless Communications: From Fundamentals to Advanced Topics (Wiley - IEEE). - Hoboken (New Jersey): Wiley, 1st Edition, 2014.
3. **Gomes N.J., Monteiro P.P., Gameiro A.** Next Generation Wireless Communications Using Radio over Fiber. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 2012.
4. **Khawaja B.A.M.** Millimetre-Wave Radio-Over-Fiber Systems Using Mode-Locked Lasers. – Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013.
5. Lightwave Catalog Volume 2: Optical-Electrical / Polarization / Complex Modulation. -Keysight Technologies, Inc., 2015.