

Keysight Technologies

Анализ характеристик
высокоскоростных
оптических компонентов

Рекомендации по применению

Измерение параметров высокоскоростных электрооптических и оптоэлектронных компонентов и устройств

- Лазеров, светодиодов
- Встроенных и внешних модуляторов
- Дискретных и интегральных фотодиодных приёмников

Содержание

Введение	3
Общие методы измерений и замечания	3
Измерения Э/О (модуляторы, лазеры, светодиоды)	4
Измерения О/Э (фотодиоды и приёмники).....	4
Измерения О/О	4
Семейство АОК	5
Процесс измерения АОК	6
Электронная калибровка	6
Настройка измерения АОК.....	7
Исключение влияния тракта	7
Калибровка оптического измерения.....	7
Факторы, влияющие на точность.....	8
Измерения оптического передатчика (Э/О)	9
Полоса модуляции, АЧХ и эффективность преобразования.....	10
Измерение лазера.....	10
Измерения импульса лазера	13
Электрооптические измерения внешнего модулятора	15
Представление АЧХ модулятора в Вт/В.....	15
Приведение чувствительности модулятора к опорному уровню выходной мощности	16
Входной импеданс передатчика.....	17
Влияние рассогласования импеданса на точность измерений.....	17
Измерения оптического приёмника (О/Э)	18
Полоса модуляции, АЧХ и эффективность преобразования фотодиода	19
Выходной импеданс фотодиода.....	21
Измерения симметричных устройств	23
Конфигурация порта	23
Измерения оптического приёмника.....	25
Процедура измерения и интерпретация результатов	26
Измерения электрических компонентов (Э/Э).....	27
Приложение 1. Сигналы в оптоэлектронных устройствах.....	28
Сигналы, используемые при измерении компонентов.....	28
Приложение 2. Работа во временной области.....	31
Основные сведения	31
Диапазон и разрешение	32
Разрешения отклика.....	33
Повышение точности измерений за счёт стробирования	33
Литература	33

Введение

С развитием оптических систем передачи разработчики и производители компонентов должны максимально улучшать характеристики своих изделий. Например, одним из наиболее часто используемых параметров для оценки качества цифровых систем является коэффициент битовых ошибок. Однако описать этим параметром отдельные компоненты сложно. В этом случае больше подходят такие фундаментальные параметры, как коэффициент усиления, полоса пропускания, АЧХ и обратные потери. Для измерения зависимости линейных электрических и оптических параметров передачи и отражения от частоты модуляции используется анализатор оптических компонентов (AOK) – Lightwave Component Analyzer (LCA). В настоящее время можно выполнять калиброванные и отслеживаемые измерения с частотой модуляции до 67 ГГц.

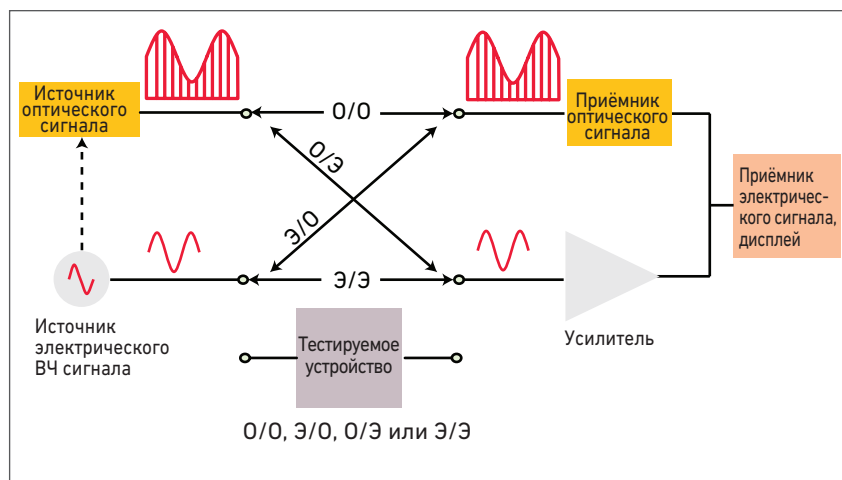


Рис. 1. Блок-схема анализатора оптических компонентов

Общие методы измерений и уточнения

Концепция анализа оптических компонентов очень проста. Для этого выполняются измерения линейных параметров передачи и отражения на малых уровнях сигналов различных оптических компонентов. Анализатор оптических компонентов состоит из СВЧ анализатора цепей с подключенным к нему комплектом для оптических измерений. Для подачи испытательного сигнала на тестируемый компонент используется прецизионный источник электрических (генератор) или оптических (передатчик) сигналов, а для измерения переданных (или отражённых) сигналов используется очень точный и калиброванный оптический или электрический приёмник. Поскольку нужно измерять характеристики в широком диапазоне частот модуляции, выполняется свипирование частоты модуляции в необходимом диапазоне.

В ходе измерений обычно определяется отношение тока (или мощности) электрического СВЧ модулированного сигнала к мощности оптического модулированного сигнала (см. рис. 2). Рис. 1 демонстрирует базовые концепции анализа оптических компонентов, а специальные процедуры измерения будут описаны далее. Описание сигналов, используемых в процессе измерения, приведено в Приложении 1 «Сигналы в оптоэлектронных устройствах».

Введение (продолжение)

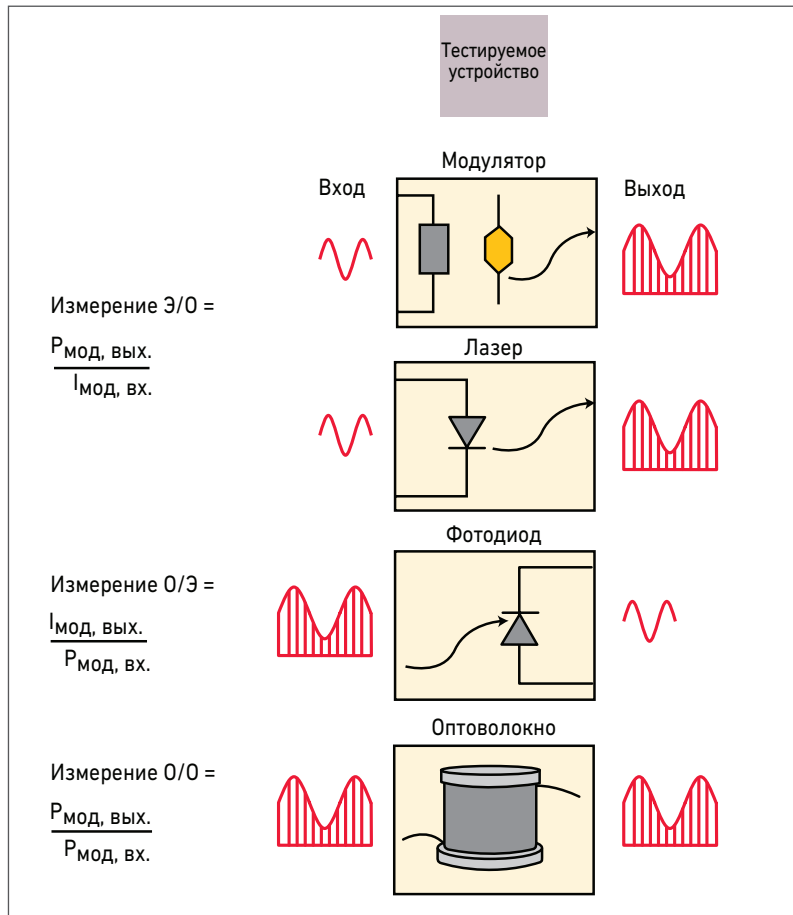


Рис. 2. Измеряемые сигналы

Измерения Э/О (модуляторы, лазеры, светодиоды)

В качестве параметров Э/О преобразователя измеряются ток или напряжение входного модулирующего сигнала и выходная мощность оптического модулированного сигнала. Для описания зависимости изменений оптической мощности от изменений входного тока (в устройствах, преобразующих ток) используется передаточная характеристика. Графически это показано на рис. 3. Зависимость для модуляторов показана на рис. 4.

Анализатор оптических компонентов измеряет ток входного модулирующего сигнала и выходную мощность модулированного сигнала и отображает отношение этих величин в Вт/А в линейном или логарифмическом масштабе.

Измерения О/Э (фотодиоды и приёмники)

Процесс измерения параметров О/Э преобразователей подобен описанному выше процессу измерения Э/О устройств. Выполняется измерение отношения тока выходного электрического демодулированного сигнала к мощности входного оптического модулированного сигнала. Передаточная характеристика О/Э преобразователей описывает зависимость изменения электрического тока от изменения оптической мощности. Графически это показано на рис. 5. Анализатор оптических компонентов измеряет мощность входного оптического модулированного сигнала и выходной модулированный ток и отображает отношение этих величин в А/Вт.

Измерения О/О

Кроме того, можно измерять характеристики чисто оптических устройств. В этом случае входной и выходной сигналы являются модулированным светом. Измерение заключается в определении зависимости коэффициента передачи от частоты.

Анализаторы оптических компонентов

Табл. 1. Анализаторы оптических компонентов

Модель	Длина волны, нм	Тип оптоволокну	Диапазон модуляции	ВЧ порты
N4373D	1310/1550	Одномодовое	10 МГц – 67 ГГц	2/4
N4374B	1310/1550	Одномодовое	100 кГц – 4,5 ГГц	2
N4375D	1310/1550	Одномодовое	10 МГц – 26,5 ГГц	2/4
N4376D	850	Многомодовое	10 МГц – 26,5 ГГц	2/4

Полный перечень анализаторов оптических компонентов, а также другого измерительного оптического оборудования приведён на сайте компании Keysight (www.keysight.com/find/lca).

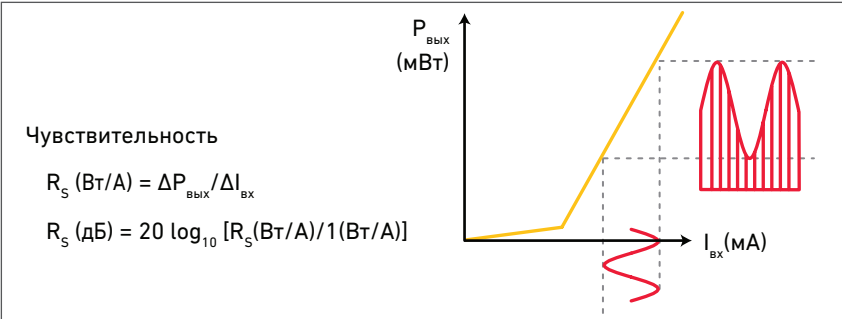


Рис. 3. Передаточная характеристика Э/О преобразователей (лазеров и светодиодов)

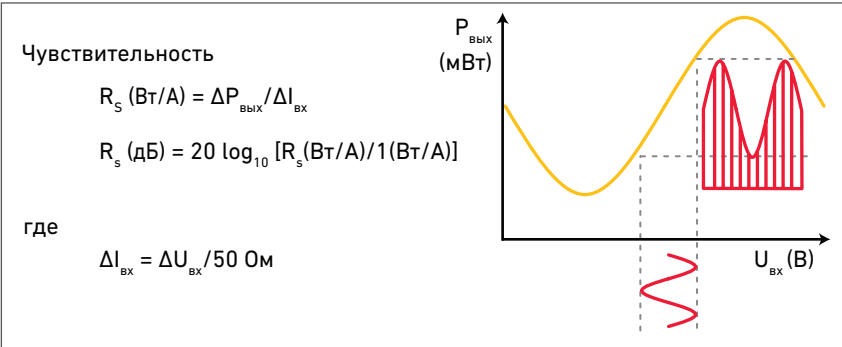


Рис. 4. Передаточная характеристика Э/О преобразователей (внешних модуляторов)

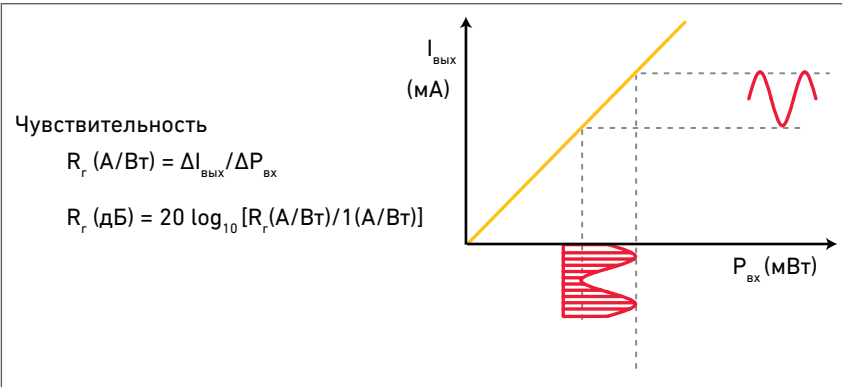


Рис. 5. Передаточная характеристика О/Э преобразователей

Процесс измерения АОК

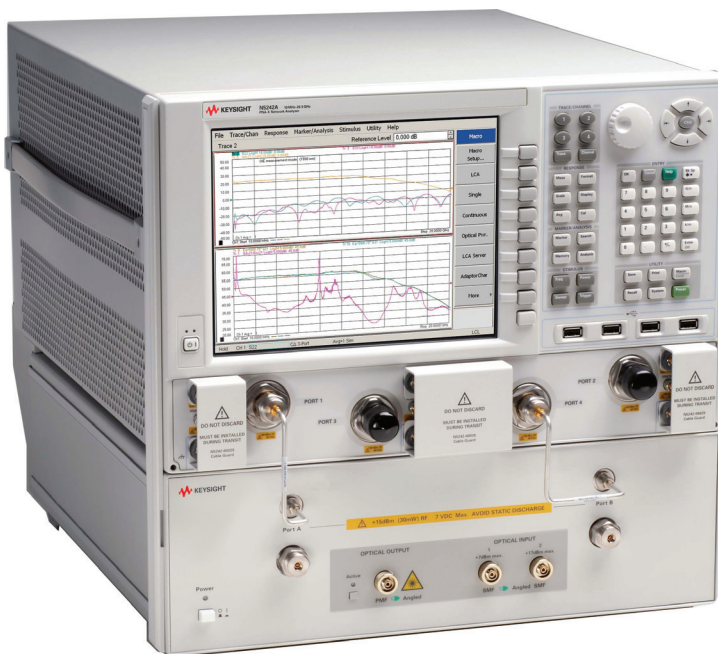


Рис. 6. N4375D

Ключом к выполнению точных S_{11} , S_{21} и S_{22} измерений является калибровка измерительных приборов. Калибровка позволяет АОК компенсировать влияние измерительной системы, включая электрические и оптоволоконные кабели, а также сам измерительный прибор. Для этого нужно проделать несколько операций калибровки/настройки. На первом этапе (до выполнения самой калибровки) нужно настроить свипирование АОК по частоте. Для этого необходимо выбрать:

- начальную и конечную частоты,
- тип свипирования (линейное, логарифмическое, пошаговое),
- число точек измерения,
- полосу ПЧ,
- уровень мощности источника ВЧ сигнала.

Электронная калибровка

На следующем этапе выполняется электронная калибровка анализатора оптических компонентов. Для калибровки необходимо запустить функцию электронной калибровки (ECAL) в анализаторе цепей, используя специальный модуль электронной калибровки. ECAL измеряет параметры всех ВЧ трактов между анализатором цепей и тестируемым устройством или комплектом для оптических измерений АОК. Мастер калибровки проведёт вас через все необходимые шаги. Функция ECAL позволяет выполнять полную автоматическую двухпортовую калибровку с использованием одного подключения к модулю ECAL и при минимальном вмешательстве оператора. При этом создаются необходимые для измерения эталонные плоскости электрической калибровки. Если для подключения тестируемого устройства используются дополнительные электрические адаптеры или элементы, эти дополнительные электрические тракты можно учесть с помощью функции «Исключение влияния ВЧ тракта» (см. «Исключение влияния ВЧ тракта»).

Процесс измерения АОК (продолжение)

Настройка измерения АОК

На следующем этапе выполняется настройка измерения АОК. Чтобы упростить процесс измерения, АОК имеет встроенный «экран настройки». На этом экране пользователь может установить все измерительные параметры АОК. Экран расширенной настройки позволяет учитывать электрические адаптеры (например, переходные разъёмы или кабели) и оптические адаптеры (например, оптические кабели или аттенюаторы) путем настройки параметров или через измерительные файлы.

Исключение влияния тракта

Встроенная в АОК функция исключения влияния тракта позволяет компенсировать дополнительные сигнальные тракты между эталонными плоскостями калибровки и тестируемым устройством, т. е. ВЧ кабели, адаптеры или пробники, оптические кабели и аттенюаторы. Эта функция особенно полезна, если нужно исключить параметры элементов тракта из результатов измерений (например, дополнительную задержку, вызванную оптическими соединениями) или изменить их после электрической калибровки (например, выбрать другие уровни оптического ослабления). Кроме того, эта функция нужна, если элементы нельзя непосредственно охватить электронной калибровкой вплоть до наконечника ВЧ пробника, например, при работе с зондовыми станциями для полупроводниковых пластин.

Исключение влияния ВЧ тракта

Для исключения влияния ВЧ тракта нужно измерить его характеристики до начала измерения АОК. Для измерения характеристик рекомендуется использовать поставляемый с анализатором цепей макрос AdapterChar. Подробное описание этого макроса приведено в онлайн-справочной системе анализатора. Результаты измерения характеристик должны быть представлены в форме файла 2-портовых S-параметров (эти файлы известны также как файлы Touchstone .s2p). В прилагаемом файле используются все S-параметры. Традиционно для АОК (где каждый порт может быть входом или выходом), эти значения являются направленными. Это значит, что порт 1 разъёма всегда подключен к анализатору цепей, а порт 2 всегда подключен к тестируемому устройству. Макрос AdapterChar анализатора цепей учитывает эту направленность.

Исключение влияния оптического тракта

Для исключения влияния оптического тракта информацию о компенсации можно получить из параметров (таких как длина оптического кабеля, коэффициент преломления и ослабление) или из файла адаптера. Файл адаптера должен быть в виде файла 2-портовых S-параметров (эти файлы известны также как файлы Touchstone .s2p). В прилагаемом файле используются все S-параметры. Оптический тракт можно охарактеризовать с помощью O/O измерения.

Калибровка оптического измерения

Последним этапом является настройка и исключение влияния оптического измерительного комплекта. Это выполняется автоматически макросом АОК с помощью функции «Fixture» (Тестовая оснастка) анализатора цепей. Дополнительная информация о тестовых оснастках приведена в документации на анализатор цепей. Источник и приёмник оптического сигнала измерительного прибора калибруются индивидуально в заводских условиях, поэтому никакой специальной оптоэлектронной калибровки выполнять не надо. Тем не менее, для выполнения прецизионных O/Э и O/O измерений можно выполнить специальную пользовательскую калибровку. В этом случае пользователь должен пройти все необходимые шаги, предлагаемые мастером калибровки. После этого эталонные систематические характеристики компонентов АОК будут обновлены.

Процесс измерения АОК (продолжение)

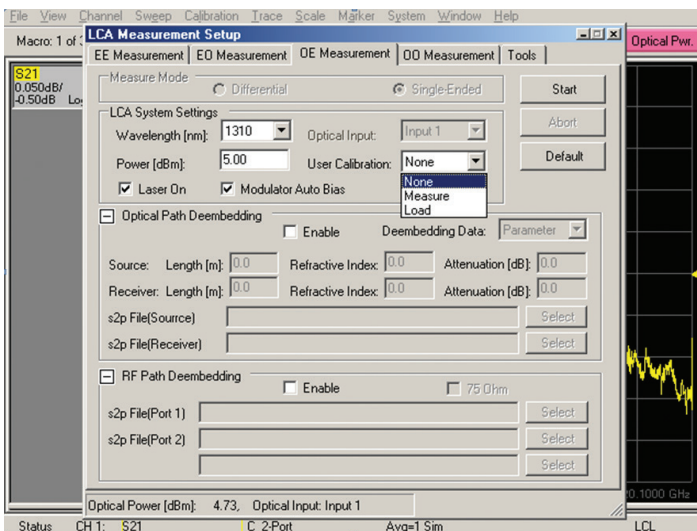


Рис. 7. Экран настройки АОК

Процедура измерения

Полученные на этих двух этапах калибровки систематические характеристики нужно вычесть для компенсации результирующей характеристики тестируемого устройства. (Подробнее это описано в Приложении 1 «Сигналы в оптоэлектронных устройствах».) По завершении калибровки можно увидеть плоскую характеристику с уровнем 0 дБ, показывающую, что влияние параметров измерительной системы устранено.

Если используется анализатор N4373D компании Keysight Technologies, то по завершении процесса настройки на экране не обязательно будет прямая линия. Если оба ВЧ кабеля всё ещё подключены к измерительному комплекту, то передатчик или приёмник измерительного комплекта остаётся подключенным и выступает в роли тестируемого устройства для измерений Э/О или О/Э. В результате на дисплей выводится его характеристика, пока он не будет заменён реальным тестируемым устройством.

Если выбрана конфигурация О/О измерений, то простую проверку параметров системы можно выполнить, измерив соединительный оптоволоконный кабель.

Для анализаторов Keysight N4375D или N4376D характеристику передатчика и приёмника измерительного комплекта можно проверить, установив соответствующий ВЧ тракт в состояние «внутренний» в окне «TOOLS» (Инструменты) на экране настройки АОК.

Факторы, влияющие на точность

Для обеспечения максимальной точности измерений рекомендуется принять следующие меры:

- содержите все электрические и оптические разъёмы в чистоте и исправном состоянии;
- следите за тем, чтобы тестируемое устройство работало в линейной области (без насыщения);
- избегайте перегрузок измерительного приёмника (особенно, когда порт 2 или 4 анализатора цепей работает в режиме «ответителя отражённого сигнала»);
- сведите к минимуму перемещения кабелей;
- дайте прибору прогреться;
- сведите к минимуму оптические отражения.

Измерения оптического передатчика (Э/О)

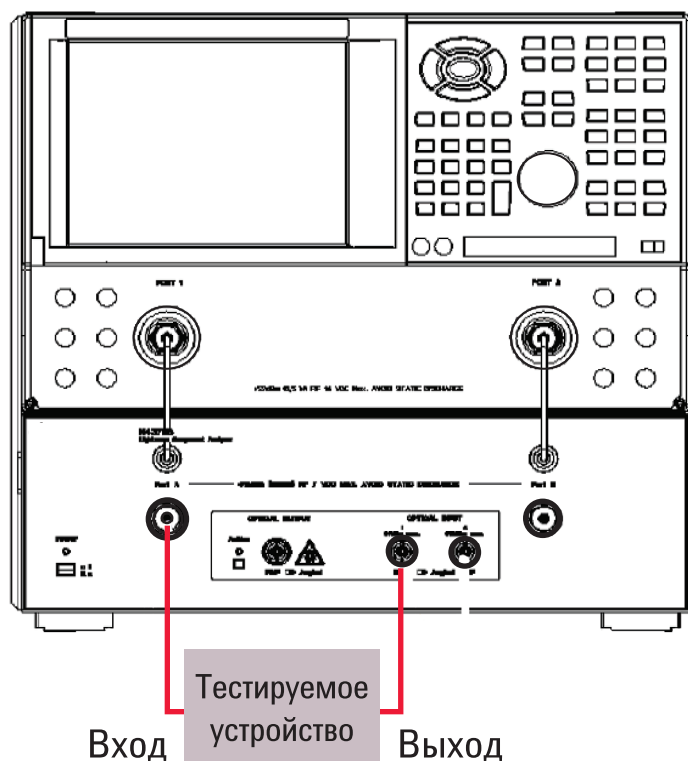


Рис. 8. Типовая схема измерения передатчика несимметричного сигнала

Для измерения зависимости параметров передачи и отражения электрооптических модуляторов, лазеров и светодиодов от частоты модуляции используется АОК. Далее мы будем рассматривать измерения следующих параметров передачи:

- полоса модуляции и АЧХ;
- эффективность преобразования;
- влияние смещения;
- параметры импульсов;
- чувствительность отражения;
- фазовая характеристика модуляции;
- входной импеданс лазера/модулятора.

Измерения оптического передатчика (Э/О) (продолжение)

Полоса модуляции, АЧХ и эффективность преобразования

Полоса модуляции определяет скорость, с которой можно модулировать оптический передатчик (лазер, модулятор), а эффективность преобразования (чувствительность) описывает, насколько эффективно входной электрический сигнал передатчика преобразуется в модулированный свет. И хотя чувствительность часто используется для описания статических параметров (или параметров по постоянному току), эффективность преобразования устройства для модулирующих сигналов является динамической характеристикой и может называться «передаточной характеристикой».

Нередко передаточная характеристика меняется в зависимости от скорости изменения электрического сигнала. С ростом частоты модуляции эффективность преобразования начинает падать. Частота, на которой эффективность преобразования падает до 0,707 от максимального значения, называется частотой среза по уровню -3 дБ (если данные отображаются в логарифмическом масштабе) и определяет полосу модуляции передатчика.

Если частотная характеристика неравномерна, и имеются частотные компоненты, выходящие за пределы полосы передатчика, то появляются искажения модулирующего сигнала. Измерение полосы модуляции состоит из подачи на лазер или модулятор электрического (ВЧ или СВЧ) сигнала и измерения его отклика (модулированного света) с помощью оптического приёмника. Обычно частота входного электрического сигнала оптоэлектронного передатчика перестраивается так, чтобы можно было охарактеризовать передатчик в широком диапазоне частот модуляции.

Измерение лазера

На рис. 9 показано измерение зависимости эффективности преобразования (S_{21}) и коэффициента электрического отражения (S_{11}) лазера от частоты модуляции. Монитор мощности (вставка на рис. 9) показывает среднюю выходную оптическую мощность тестируемого устройства.

Для отображения используются единицы измерения Вт/А (по вертикальной оси). В данном случае используется логарифмическая шкала, причём 0 дБ соответствует значению 1 Вт/А. По горизонтальной оси отложена частота модуляции. Видно, что измерение выполнялось в широком диапазоне частот, в данном случае от 10 МГц до 20 ГГц. Как уже говорилось, это измерение показывает, насколько быстро можно модулировать лазер. Этот конкретный лазер демонстрирует типовой резонансный пик релаксации на частоте около 16,5 ГГц. Выше этой частоты эффективность преобразования постепенно падает. Имеются два важных фактора, ограничивающих полосу модуляции. Один – это конструкция лазера, включая физические размеры и технологии изготовления. Второй – это эффективность подачи на лазер электрического сигнала. Показателем качества согласования импеданса является коэффициент электрического отражения. Для этого конкретного лазера согласование ухудшается на высоких частотах. (Детальное описание влияния согласования импеданса передатчика приведено в разделе «Входной импеданс передатчика».)

Измерения оптического передатчика (Э/О) (продолжение)



Рис. 9. Измерение полосы модуляции Э/О

Влияние смещения на характеристику лазера

Частотная характеристика лазера зависит от условий смещения. С ростом постоянного напряжения на лазере его полоса обычно увеличивается. Зачастую это связано с характеристиками «релаксационных колебаний», которые зависят от смещения. Явление релаксационных колебаний порождает резонанс частотной характеристики, шум и искажения лазера. На рис. 10 показано измерение полосы, выполненное при четырёх различных комбинациях смещения и выходной мощности. Обратите внимание, что две нижние кривые имеют пик перед спадом. Это и есть область релаксационных колебаний. Модулируя лазер в этой области нужно учитывать, что именно здесь присутствуют максимальные шумы и искажения. С ростом смещения растёт как пик, так и полоса. Для данного лазера пик начинает насыщаться, когда смещение достигает определённой точки.

Фазовая характеристика модуляции

В идеальном случае огибающая модуляции лазера должна демонстрировать линейную зависимость фазы от частоты модуляции. Если отношение сдвига фазы к частоте модуляции не остаётся постоянным, то появляется некоторая форма искажений. Фазовую характеристику лазера можно отобразить двумя способами. Один заключается в непосредственном отображении фазовой характеристики, а второй – в отображении фазовой характеристики в виде «задержки».

Измерения оптического передатчика (Э/О) (продолжение)

Процедура измерения и интерпретация результатов

Чтобы отобразить информацию о фазе, нужно просто выбрать формат данных «phase» (фаза) вместо стандартного «log mag.» (логарифм амплитуды). Если тестируемое устройство имеет достаточно большую длину оптического или электрического тракта, то для наблюдения фазовой характеристики лазера понадобится некоторая компенсация длины, например с помощью функции электрической задержки (клавиша «Scale Ref»).

В данном измерении была добавлена электрическая задержка 18 нс, поскольку общая длина оптоволоконного оптического приёмника тестируемого устройства составила около 3,6 м. Как правило фазовая характеристика «повторяет» частотную характеристику. Частотная характеристика этого лазера имеет пик на том же участке диапазона, где фаза отклоняется от линейной зависимости. Иногда фазовую характеристику проще интерпретировать и использовать, если представить её в виде «задержки». График задержки используется для индикации отклонения групповой задержки от произвольной средней задержки для тестируемого устройства Э/О. В идеальном случае эта групповая задержка будет одинаковой для всех интересующих нас частот модуляции. На рис. 11 показана задержка для лазера 10 G.

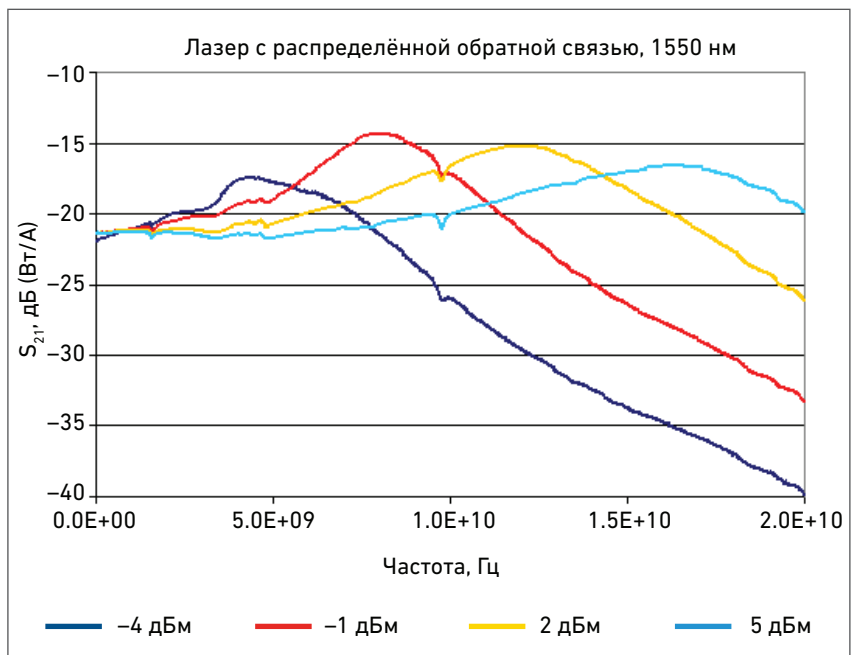


Рис. 10. Измерение полосы лазера с распределённой обратной связью

Измерения оптического передатчика (Э/О) (продолжение)

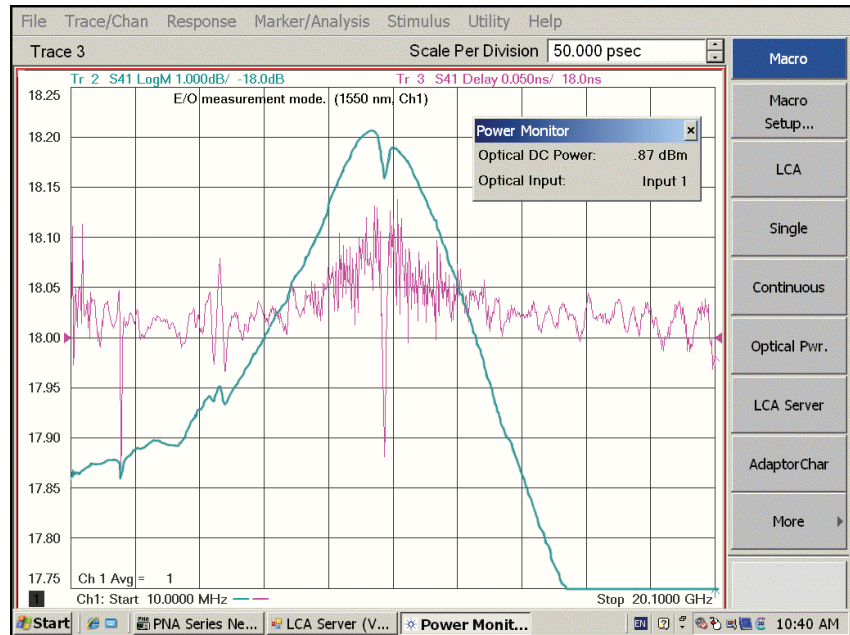


Рис. 11. Измерение задержки Э/О

Измерение импульсных характеристик лазера

Из данных частотной области (полоса модуляции) с помощью соответствующих функций анализатора можно получить параметры временной области. АОК математически обрабатывает результаты измерений в частотной области (полосу) с помощью некоторой формы обратного преобразования Фурье, прогнозируя эффективную переходную и/или импульсную характеристику лазера. (См. приложение 2 «Работа во временной области. Основные сведения».)

Результаты измерения и их интерпретация

На рис. 12 показана спрогнозированная импульсная характеристика высокоскоростного лазера. Данные отображаются в линейном формате (в отличие от логарифмического в дБ). Это измерение даёт нам несколько полезных параметров. Один из них – это базовая длительность импульса, которая характеризует быстродействие устройства. Длительностью импульса называется время между маркерами R и 1 в точках половины максимума. Однако частично характеристика обусловлена конечной полосой пропускания самого измерительного прибора.

Обратите внимание, что здесь присутствуют и другие импульсы. Обычно это говорит о наличии релаксационных колебаний. На рис. 13 показана спрогнозированная переходная характеристика того же лазера. По этому измерению можно определить время нарастания, звон и выброс. В общем случае эти параметры непосредственно связаны с частотной характеристикой устройства.

Процедура измерения

Измерения импульсов выполняются путем обработки результатов измерений в частотной области. Поэтому процедура измерения почти ничем не отличается от процедуры, использованной для измерения полосы модуляции. (Потенциальные отличия связаны с требованиями математического преобразования. См. приложение 2 «Работа во временной области».)

Измерения оптического передатчика (Э/О) (продолжение)

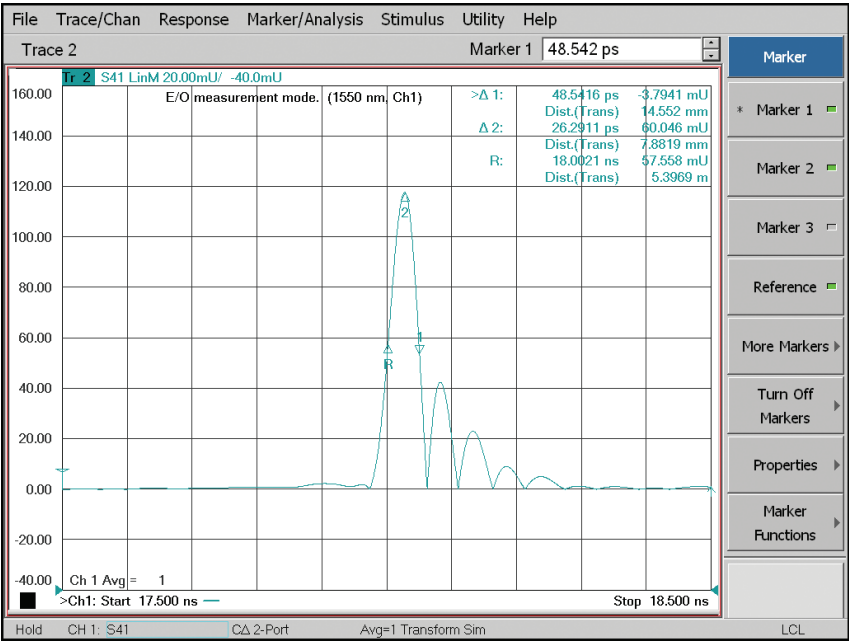


Рис.12. Импульсная Э/О характеристика лазера

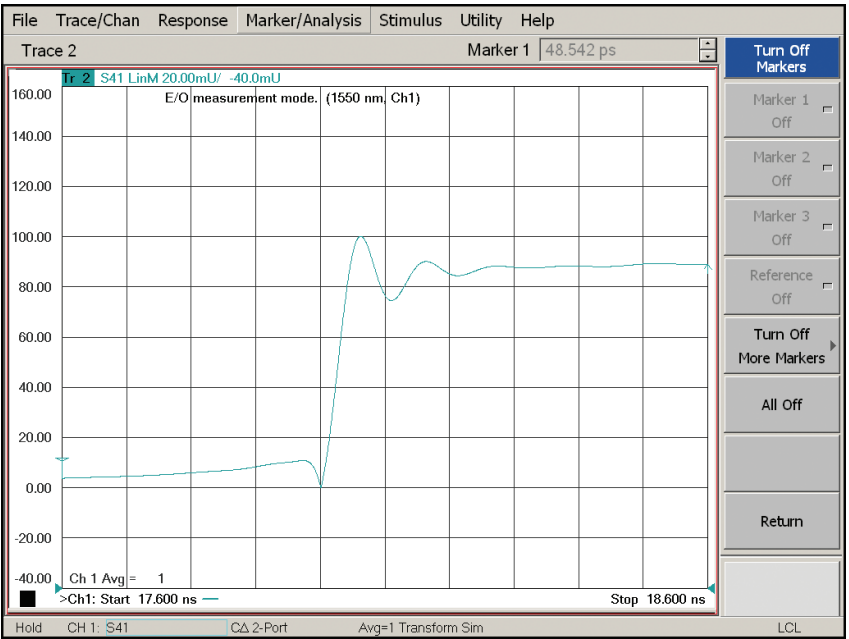


Рис.13. Переходная Э/О характеристика лазера

Измерения оптического передатчика (Э/О) (продолжение)

Электрооптические измерения внешнего модулятора

Внешние модуляторы интенсивности света можно охарактеризовать тем же способом, что и источники лазерного излучения. Эти измерения относятся к другому классу Э/О измерений, в котором в качестве воздействующего сигнала используется перестраиваемый по частоте электрический сигнал, а отклик модулятора представляет собой модулированный по интенсивности свет. В частности, измерения полосы модуляции, фазы и электрического импеданса выполняются с помощью анализатора компонентов в той же конфигурации, которая использовалась для измерения лазера. Тем не менее, существуют и серьёзные отличия, поскольку модулятор является трёхпортовым устройством. К оптическому входу модулятора подключается источник немодулированного оптического сигнала.

На рис. 14 показана характеристика модулятора S_{21} в ваттах на ампер (светло-синяя) и S_{11} (коричневая).

Фазовая характеристика и входной электрический импеданс измеряются так же как и в случае измерений лазера. Кроме того, информацию в частотной области можно использовать для прогнозирования переходной и импульсной характеристики.

Представление чувствительности модулятора в Вт/В

Обычно лазеры описываются зависимостью выходной мощности от входного тока. Однако для описания модулятора предпочтительней использовать зависимость выходной мощности от входного напряжения.

Поскольку измерения с помощью АОК предполагают использование сигнальных трактов с волновым сопротивлением 50 Ом, то результаты измерения модулятора в ваттах на ампер можно преобразовать в ватты на вольт путём деления на 50. В анализаторах цепей Keysight серии PNA для этого можно воспользоваться функцией «Equation» (Уравнение) и разделить результирующую кривую на 50.

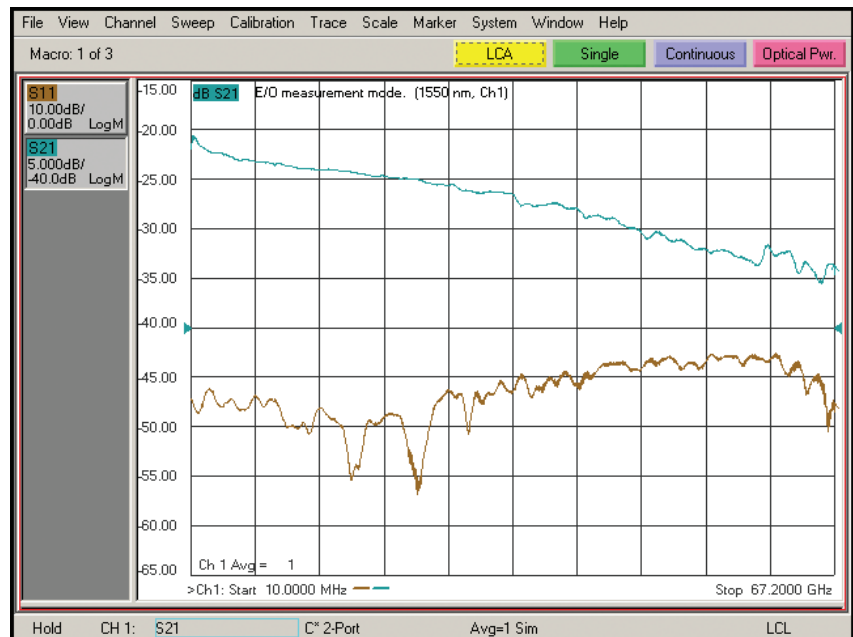


Рис. 14. Характеристика модулятора S_{21}

Измерения оптического передатчика (Э/О) (продолжение)

Приведение чувствительности модулятора к опорному уровню выходной мощности

Хотя частотная характеристика модулятора, как правило, не зависит от входной оптической мощности, на чувствительность это не распространяется. Эффективность преобразования модулятора зависит не только от электрического входного сигнала, но и от уровня оптического входа. Измерение АОК сопоставляет мощность выходного модулированного сигнала с входным модулирующим током. Затем вычисляется и отображается чувствительность, выраженная в ваттах на ампер. С ростом входной оптической мощности обычно растёт и выходной модулированный сигнал. В результате кажущаяся чувствительность возрастает. Это значит, что измерение чувствительности модулятора достоверно лишь для определенной входной (или выходной) оптической мощности, которая существует во время выполнения измерения. Частотная характеристика обычно достоверна в широком диапазоне входной мощности.

Для отображения чувствительности модулятора при опорном уровне входной мощности нужно взять уровень мощности, измеренный с помощью внутреннего измерителя мощности (преобразованный в Вт), и преобразовать чувствительность с помощью функции «Equation» (уравнение) согласно приведённой ниже формуле 1.

Анализ модулятора

На рис. 15 показана измеренная зависимость относительной эффективности преобразования (S_{21}) и коэффициента электрического отражения (S_{11}) от частоты модуляции для двух широкополосных внешних модуляторов (40 G). Необычная характеристика «плохого» модулятора в районе частоты 55 ГГц связана с нарушением согласования электрического импеданса ВЧ тракта внутри модулятора. Примеры измерения чётко демонстрируют проблемы электрических параметров модулятора выше 50 ГГц. Плохой модулятор имеет острый резонанс, порождающий очень большое значение S_{11} и, как следствие, глубокий провал в характеристике S_{21} , что делает этот компонент неприменимым во многих приложениях.

$$S_{21}(P) = S_{21}(P_{\text{опорн.}}) * 10^{(0,1 * (P [\text{дБм}] - P_{\text{опорн.}} [\text{дБм}]))}$$

Формула 1. Зависимость чувствительности модулятора от средней оптической мощности

где $S_{21}(P)$ – это коэффициент S_{21} для конкретной оптической мощности, а $S_{21}(P_{\text{опорн.}})$ – это коэффициент S_{21} для оптической мощности, на которой выполняется измерение.

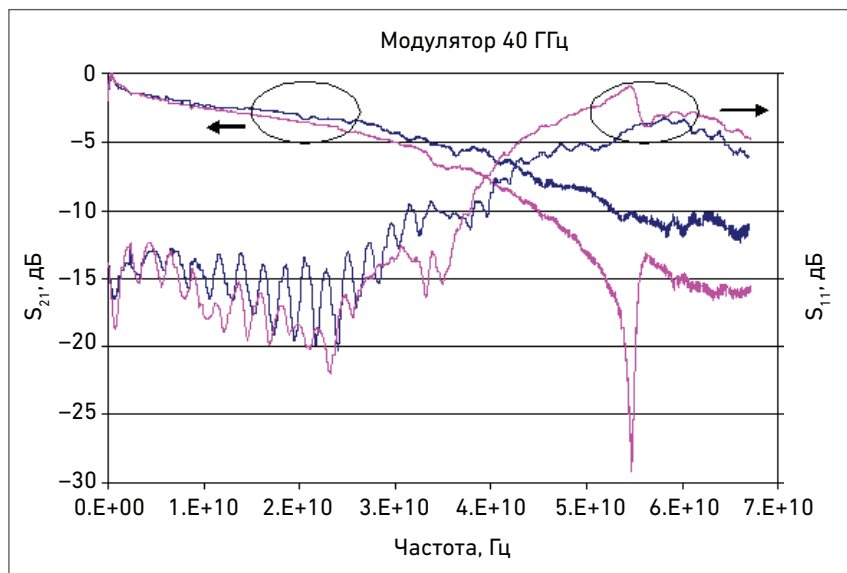


Рис. 15. Эффективность преобразования S_{21} и электрические обратные потери S_{11} двух различных модуляторов 40 ГГц

Измерения оптического передатчика (Э/О) (продолжение)

Входной импеданс передатчика

Эффективность преобразования передатчика зависит не только от его собственных свойств, но и от эффективности доставки электрического модулирующего сигнала к лазеру или ИС модулятора. Высокоскоростные модулирующие сигналы обычно передаются в ИС по линиям передачи с волновым сопротивлением 50 или 75 Ом. Максимально эффективная передача мощности в таких линиях достигается в случае, если входной импеданс ИС равен импедансу линии передачи.

Допустим, например, что входной импеданс активного лазерного модуля значительно меньше импеданса линии передачи, по которой в него поступает сигнал. При таком рассогласовании импеданса возникают две проблемы. Во-первых, значительная часть энергии отражается от точки подключения линии передачи к лазерному модулю. Эта отражённая энергия может отразиться повторно и исказить полезный сигнал. Вторая проблема заключается в том, что отражённая энергия пропадает зря, поскольку она никогда не используется для модуляции лазера. Таким образом общая эффективность преобразования лазера снижается.

Процедура измерения

На рис. 15 показаны обратные потери модуляторов с согласующей цепью, измеренные анализатором оптических компонентов. В ходе измерения на тестируемый модулятор подавался перестраиваемый по частоте ВЧ сигнал, и при этом измерялась отражённая назад энергия. Схема измерения и процедура калибровки будут зависеть от используемой модели АОК. Во всех случаях для точного измерения отражения необходима однопортовая (или полная двухпортовая) калибровка, предпочтительно с помощью комплекта для электронной калибровки со встроенными известными калибровочными мерами отражения электрического сигнала.

Интерпретация результатов

Коэффициент отражения во всём диапазоне 67 ГГц меняется от менее –18 дБ в лучшем случае до –2 дБ в худшем. Обычно отражение увеличивается с ростом частоты модуляции. Обратными потерями называется отношение отражённой ВЧ мощности к падающей ($10 \log (P_{\text{отр}}/P_{\text{пад}})$). Чем меньше величина обратных потерь, тем меньше отражённый сигнал и тем лучше согласование импеданса.

По-другому коэффициент отражения можно представить в виде диаграммы Смита. Диаграмма Смита представляет собой карту импеданса (см. рис. 19). Здесь на экране показана зависимость входного импеданса от частоты. Импеданс модулятора близок к 50 Ом в диапазоне 30 ГГц, и отклик не сильно отклоняется от центра диаграммы. Диаграмму Смита можно выбрать в меню «Format» (Формат).

Влияние рассогласования импеданса на точность измерений

Если входной импеданс устройства Э/О сильно отличается от 50 Ом, то значительная часть поступающей в устройство электрической энергии будет отражена. Эта отражённая энергия учитывается в полном двухпортовом измерении и, таким образом, не снижает точности измерения, как это было в прежних системах АОК. Тем не менее, собственная характеристика устройства измеряется с некоторыми неравномерностями, возникающими из-за отражения.

Измерения оптического приёмника (О/Э)

Измерения, которые выполняет АОК на оптических приёмниках, во многом подобны измерениям, выполняемым на источниках оптического излучения, только в данном случае в качестве испытательного сигнала используется модулированный свет, а откликом является демодулированный электрический сигнал. Измерения включают:

- Измерение чувствительности и полосы модуляции фотодиода
- Измерение трансимпедансного усиления фотоприёмника
- Измерение дифференциального усиления, разбаланса и коэффициента подавления синфазного сигнала детектора/приёмника с симметричным входом
- Измерение переходной и импульсной характеристики
- Измерение и оптимизация выходного электрического импеданса

Как и в случае передатчика, измерения полосы модуляции связаны с временем нарастания и спада, тогда как измерения импеданса важны для минимизации отражений и наиболее эффективной передачи электрической мощности.

На рис. 16 показана схема измерения несимметричного приёмника (то есть приёмника с одним электрическим выходом вместо дифференциальной пары).

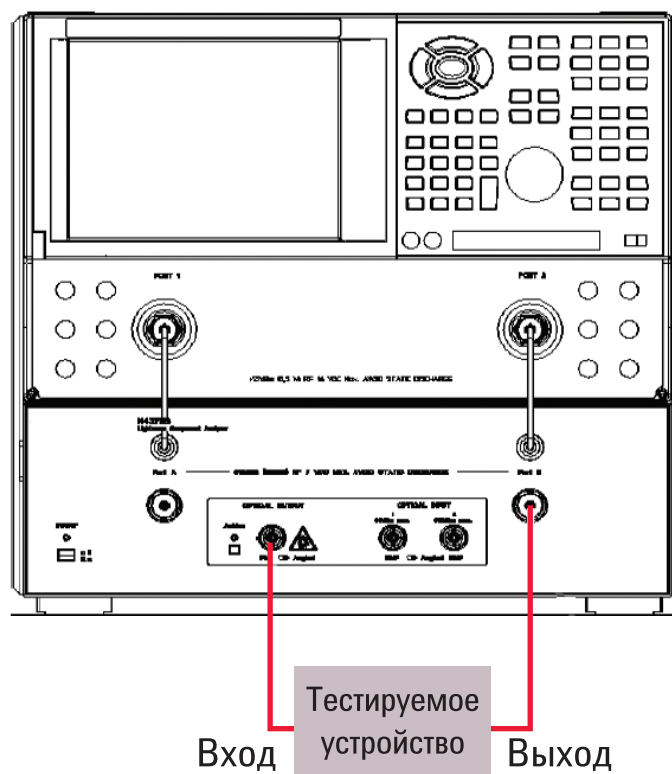


Рис. 16. Схема измерения О/Э

Измерения оптического приёмника (О/Э) (продолжение)

Полоса модуляции, АЧХ и эффективность преобразования фотодиода

Как уже обсуждалось, эффективность преобразования фотодиода показывает, как изменение оптической мощности преобразуется в изменение выходного электрического тока. С ростом частоты модуляции эффективность приёмника падает. Таким образом, устройство обладает ограниченной полосой модуляции. Измерение полосы модуляции заключается в подаче на фотодиод модулированного света и измерении тока (ВЧ или СВЧ) на выходе электрического приёмника. Обычно выполняется свипирование частоты модуляции, чтобы исследовать фотодиод или оптический приёмник в широком диапазоне частот модуляции.

Результаты измерения и их интерпретация

На экране прибора (рис. 17) отображается зависимость эффективности преобразования фотодиода от частоты модуляции. По вертикальной оси отложена эффективность преобразования в А/Вт, а по горизонтальной – частота модуляции. В данном случае вертикальная шкала является логарифмической, причём 0 дБ соответствует значению 1 А/Вт.

Тестируемый фотодиод демонстрирует полосу модуляции примерно 20-25 ГГц. Измерение обратных потерь даёт типичную характеристику чисто резистивно согласованного детектора. Она показывает превосходное согласование на очень малых частотах, но плохое согласование при приближении к верхней границе полосы модуляции из-за паразитного шунтирования согласующего резистора ёмкостью микросхемы детектора.



Рис. 17. Измерение чувствительности и электрических обратных потерь О/Э.

Измерения оптического приёмника (О/Э) (продолжение)

Процедура измерения

Данный процесс измерения практически идентичен процессу измерения передатчика. Просто следуйте шагам, описанным в разделе «Процесс измерения АОК». Для улучшения результатов калибровки частотной характеристики рекомендуется пользовательская калибровка.

Пошаговая процедура выполняет перекалибровку передатчика АОК по простой схеме, показанной на рис. 18.

После калибровки можно предполагать, что мы имеем плоскую характеристику с уровнем 0 дБ, что означает устранение неравномерности АЧХ измерительной системы. Если используется анализатор Keysight N4373D, то на экране после пользовательской калибровки не обязательно будет отображаться прямая линия. Используемый в процессе калибровки приёмник О/Э, который всё ещё присутствует в измерительном тракте, воспринимается как тестируемое устройство. Именно его характеристика и отображается на экране.

В измерительный тракт включается исследуемый приёмник, после чего мы можем увидеть его характеристику, как было показано ранее на рис. 17 «Измерение чувствительности и электрических обратных потерь О/Э».

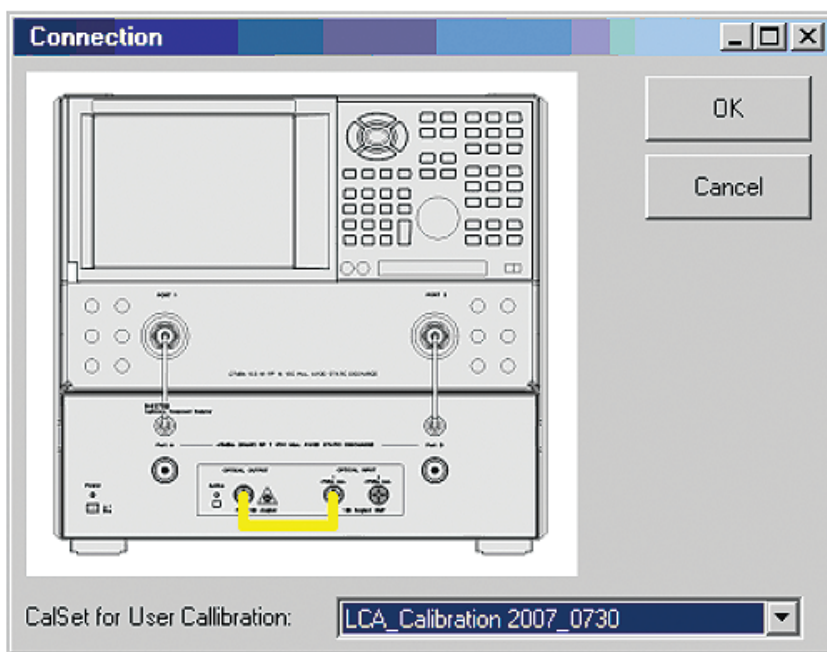


Рис. 18. Конфигурация пользовательской калибровки О/Э

Измерения оптического приёмника (О/Э) (продолжение)

Выходной импеданс фотодиода

После того как фотодиод преобразовал модулированный свет в пропорциональный выходной ток, нужно с минимальными потерями передать этот сигнал дальше в электрическую схему. В высокоскоростных системах такая передача выполняется обычно по линиям с волновым сопротивлением 50 или 75 Ом. Выходной импеданс фотодиода, как правило, значительно превышает 50 Ом (или 75 Ом). Это создаёт возможность отражения сигнала и снижает эффективность преобразования. Если на пути сигнала, передаваемого от фотодиода, встретится рассогласование импеданса, то энергия будет отражена в сторону светодиода.

Затем энергия отразится в прямом направлении и может создать помеху исходному сигналу. Таким образом, отражения ведут к ухудшению связи.

Процедура измерения и интерпретация результатов

Схема измерения и само измерение обратных потерь фотодиода идентичны процедуре, используемой для измерения обратных потерь лазера. См. раздел «Входной импеданс лазера». На рис. 19 показан коэффициент отражения оптического приёмника, измеренный анализатором компонентов и представленный в виде диаграммы Смита. Диаграмма Смита представляет собой карту импеданса. На экране отображается зависимость выходного импеданса от частоты.

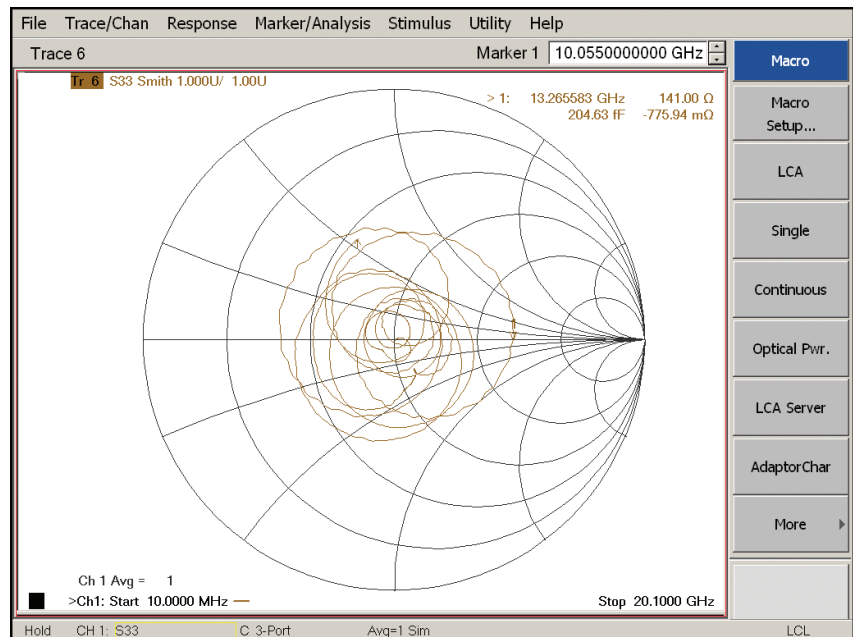


Рис. 19. Коэффициент отражения оптического приёмника в виде диаграммы Смита

Измерения оптического приёмника (О/Э) (продолжение)

Процедура измерения и интерпретация результатов (продолжение)

В этом приёмнике фотодиод подключен ко входу электрического усилителя, поэтому измеренный импеданс на самом деле является импедансом усилителя. В измерительном диапазоне 20 ГГц импеданс сильно отклоняется от 50 Ом (центра диаграммы Смита). В идеальном случае импеданс сохранял бы постоянное значение 50 Ом (или 75 Ом). Представление данных в виде диаграммы Смита выбирается в меню «Format» (Формат).

Кроме того, данные можно вывести в виде коэффициента отражения, т. е. отношения отражённой мощности к падающей ($10 \log (P_{\text{отр}}/P_{\text{пад}})$), как показано желтым цветом на рис. 17.

С помощью измерений во временной области АОК можно определить местоположение неоднородностей в электрическом тракте модуля фотодиода.

На рис. 20 показано представление «время-расстояние» для модуля ROSA (оптический подузел приёмника), установленного в тестовую оснастку. Отражение, отмеченное маркером 3, порождается разделительным конденсатором. Маркер 1 указывает отражения от контакта разъёма ROSA в точке соединения с тестовой оснасткой, а маркер 2 – наиболее сильное отражение от выходной микросхемы ROSA.

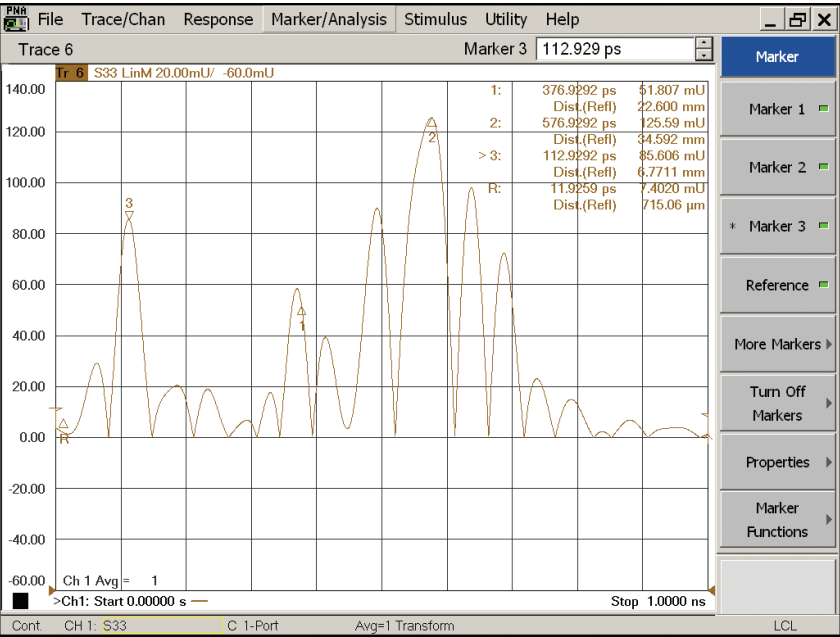


Рис. 20. Представление электрических отражений во временной области

Измерения симметричных устройств

Оптические трансиверы для каналов 10 GE или новых (сложных) форматов модуляции требуют применения симметричного электрического интерфейса и, как правило, имеют один оптический порт и два электрических порта. В качестве примера такого устройства можно привести модуль ROSA (оптический подузел приёмника), который представляет собой фотодетектор, объединённый с трансимпедансным усилителем с двумя электрическими выходами и с двухвходовыми низковольтными модуляторами на основе ниобата лития (LiNbO_3) для формирования сигнала 43 Гбит/с.

Обычно такие симметричные устройства являются 3-портовыми. Электрические порты работают по двухтактной схеме, то есть со сдвигом фазы на 180° . Многопортовый анализатор цепей AOK может измерять отдельные несимметричные параметры передачи с каждого входного электрического порта на оптический выходной порт и наоборот, а также симметричные параметры передачи с дифференциальных электрических портов на несимметричный оптический порт.

Конфигурация порта

Для симметричных измерений нужно привязать физические порты анализатора цепей к логическим портам (см. рис. 21-23). Логические порты имеют следующую конфигурацию: (логический) порт 1 определён как несимметричный порт, а (логический) порт 2 определён как симметричный дифференциальный порт.

Для измерений О/Э несимметричный (SE) порт 1 привязывается к порту 1 анализатора цепей, а симметричный (BAL) порт 2 – к портам 2 и 3 анализатора цепей (см. рис. 22). Для измерений Э/О несимметричный (SE) порт 1 привязывается к порту 4 анализатора цепей, а симметричный (BAL) порт 2 – к портам 2 и 3 анализатора цепей (см. рис. 23).

Теперь анализатор цепей может строить кривые для симметричных устройств, такие как дифференциальная чувствительность S , коэффициент подавления синфазного сигнала или разбаланс. Поскольку оптоэлектронные компоненты являются однонаправленными невзаимными устройствами, допустимы только те типы измерений, которые обведены на рис. 24 овалами.

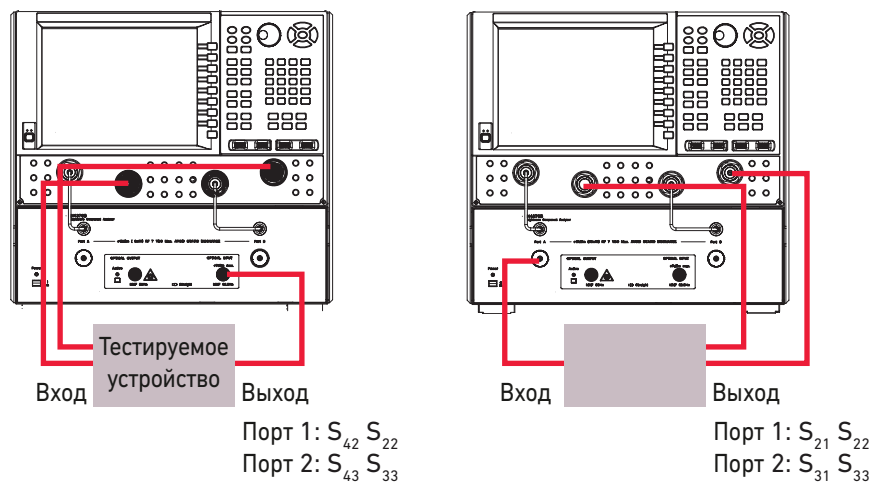


Рис. 21. Схема измерения симметричных устройств Э/О и О/Э

Измерение симметричных устройств (продолжение)

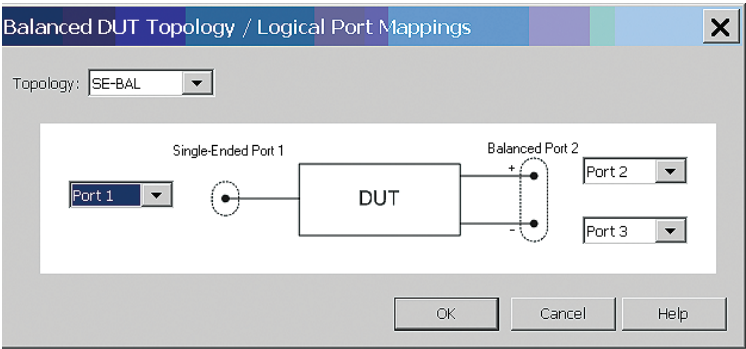


Рис. 22. Распределение логических портов для измерения 0/3

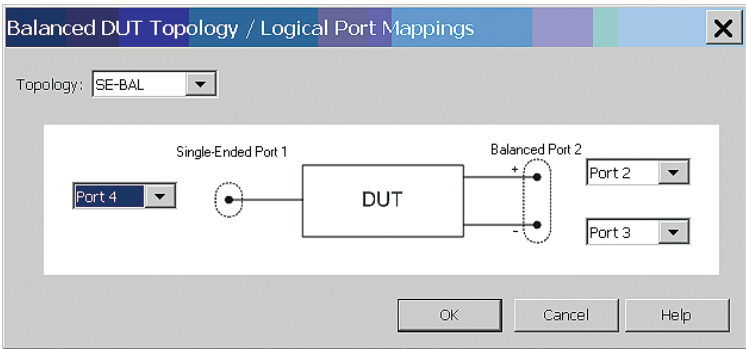


Рис. 23. Распределение логических портов для измерения Э/0

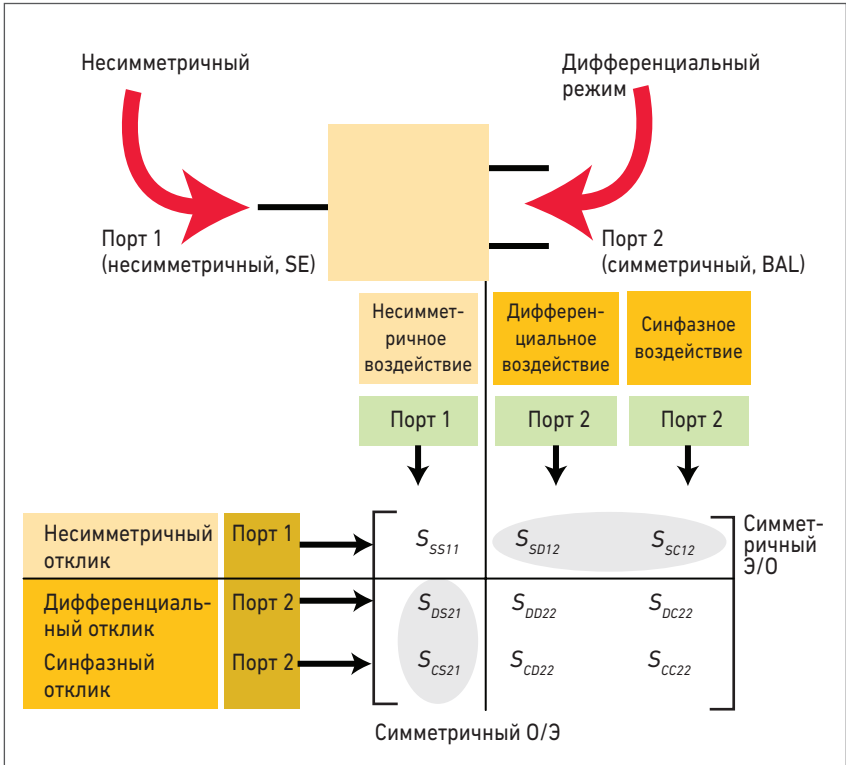


Рис. 24. Типы симметричных измерений для оптоэлектронных компонентов

Измерение симметричных устройств (продолжение)

Измерения оптического приёмника

Следующим примером будет измерение модуля ROSA (оптического подузла приёмника). ROSA состоит из PIN-фотодетектора на основе InGaAsP, размещенного в одном корпусе с широкополосным трансимпедансным усилителем с двумя электрическими выходами (A, B), которые работают с разностью фаз 180°. Модуль ROSA имеет высокую чувствительность при входной оптической мощности -20 дБм. Для подачи на ROSA допустимых входных уровней мощности в показанной на рис. 25 схеме измерения используется оптический attenuатор.

Для измерения фототока и определения квантовой эффективности фотодетектора используется амперметр. Для корректного измерения общей эффективности преобразования приёмника нужно исключить из сигнального тракта attenuатор. Уровень ослабления attenuатора устанавливается в поле «Attenuation» в разделе «Optical Path Deembedding» (Исключение оптического тракта) экрана настройки 0/3 (см. рис. 26).

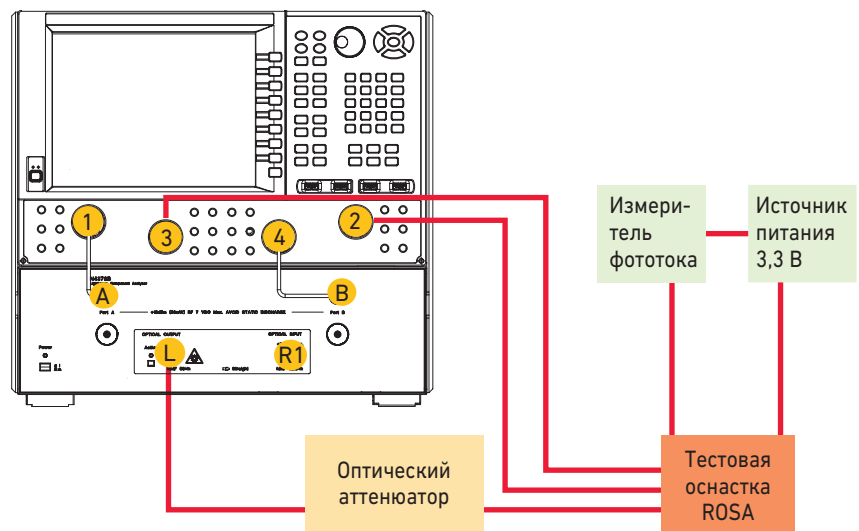


Рис. 25. Схема измерения модуля ROSA

Измерение симметричных устройств (продолжение)

Процедура измерения и интерпретация результатов

На рис. 27 показан экран типового измерения дифференциальной эффективности, обратных потерь электрического порта, трансимпедансного усиления каждого порта и нормализованного коэффициента подавления синфазного сигнала.

Трансимпедансное усиление определяется формулой 2. Квантовая эффективность фотодетектора измеряется амперметром. Редактор уравнений в анализаторе цепей позволяет выполнить непосредственный расчёт и отобразить трансимпедансное усиление каждого отдельного тракта О/Э. Обведённая секция в нижней части рис. 25 показывает разбаланс между трансимпедансным усилением портов А и В, приводящий к значительному снижению коэффициента подавления синфазного сигнала.

$$T = \frac{50 \text{ Ом}}{\eta_{DC}} \cdot S_{OE}$$

Формула 2. Определение трансимпедансного усиления

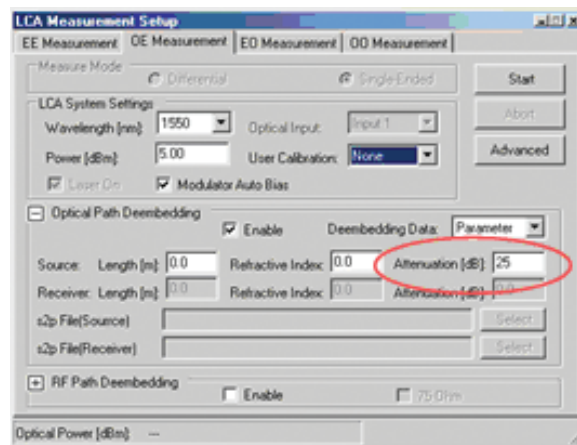


Рис. 26. Установка уровня ослабления

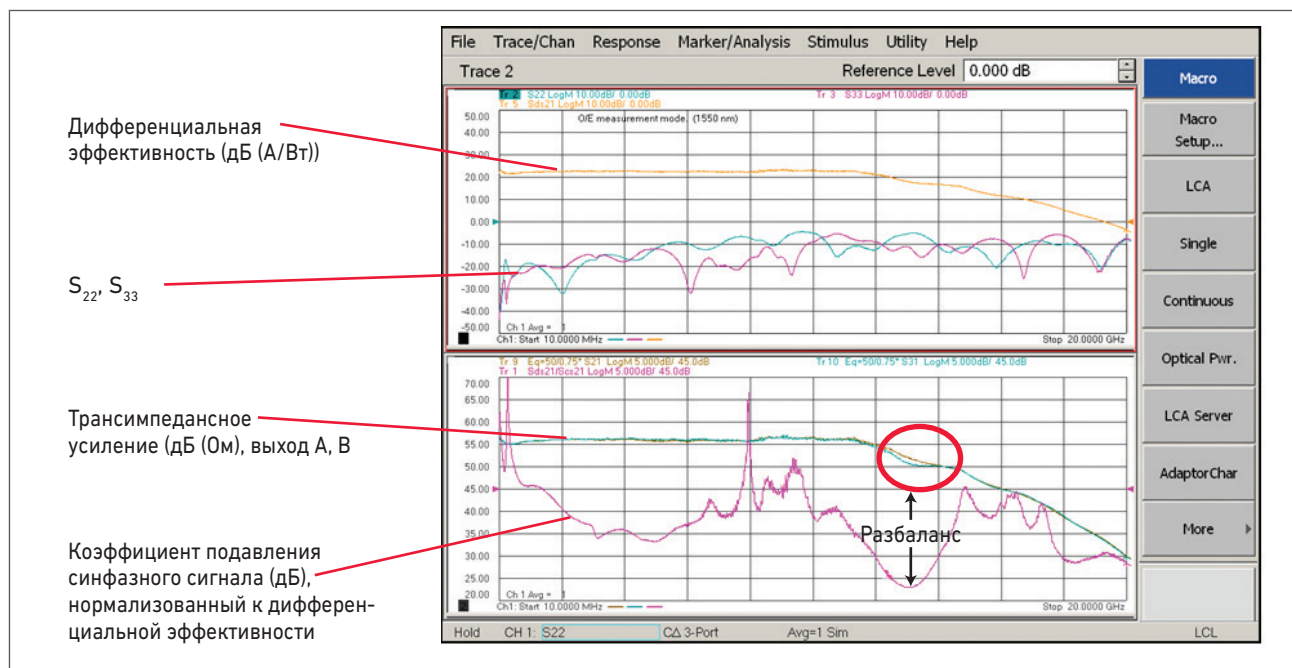


Рис. 27. Экран симметричного измерения модуля ROSA

Измерение симметричных устройств (продолжение)

На рис. 28 показано поведение модуля ROSA при входной оптической мощности в диапазоне от -25 дБм до -5 дБм. Для уровней выше -10 дБм трансимпедансное усиление насыщается, что приводит к возникновению отсечки.

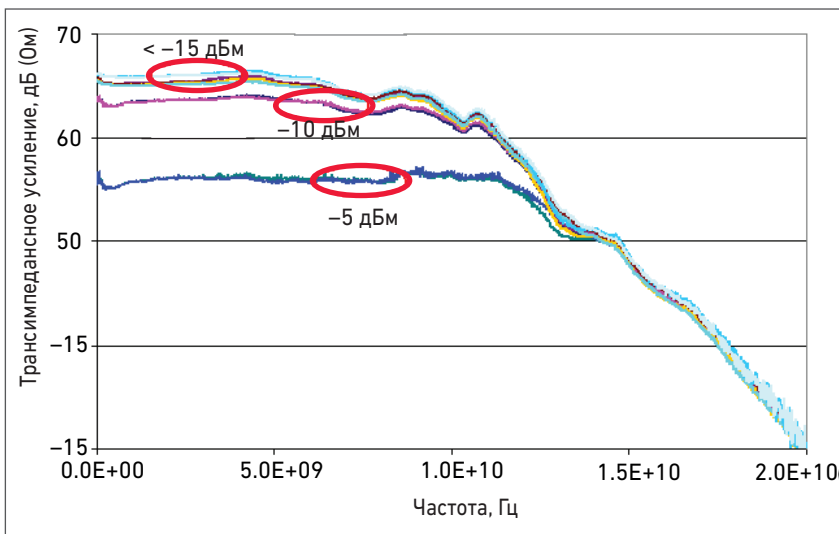


Рис 28. Трансимпедансное усиление модуля ROSA для различных уровней входной оптической мощности

Измерения электрических компонентов (Э/Э)

Анализаторы оптических компонентов могут выступать в роли анализаторов ВЧ и СВЧ цепей. В этом режиме их можно применять для измерения параметров электрических компонентов, используемых в оптоэлектронных системах, включая усилители, фильтры, ответвители и т. п.

Приложение 1. Сигналы в оптоэлектронных устройствах

Сигналы, используемые при измерении компонентов

Метод измерения АОК опирается на концепции, используемые для измерения параметров ВЧ и СВЧ устройств. Метод «S-параметров» или метод матрицы рассеяния является проверенным и удобным способом измерения параметров устройств. В следующем разделе описывается применение подобных методов для измерения параметров устройств в оптической области и демонстрируются основы измерения чувствительности Э/О и О/Э.

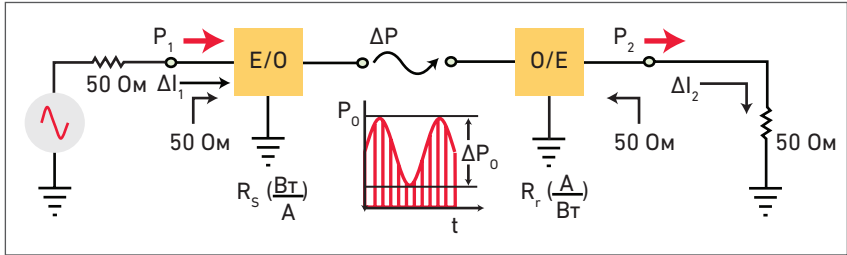


Рис. 29. Карта сигналов

На рис. 29 представлена общая структурная схема оптоэлектронной системы, на которой показаны входные и выходные напряжения и токи, а также мощность оптического модулированного сигнала. Для описания прохождения переданного и отражённого сигнала в устройстве или схеме используются S-параметры.

Для этой модели определены следующие S-параметры:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad (a_2 = 0)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \quad (a_1 = 0)$$

где:

$$a_1 = \frac{\Delta V_1}{\sqrt{Z_0}} \quad \rightarrow \quad \text{Сигнал, падающий на устройство Э/О}$$

$$= \Delta I_1 \cdot \sqrt{Z_0}$$

$$b_1 = \frac{\Delta V_1}{\sqrt{Z_0}} \quad \rightarrow \quad \text{Сигнал, отражённый от устройства Э/О}$$

$$a_2 = \frac{\Delta V_2}{\sqrt{Z_0}} \quad \rightarrow \quad \text{Сигнал, падающий на устройство О/Э}$$

$$b_2 = \frac{\Delta V_2}{\sqrt{Z_0}} \quad \rightarrow \quad \text{Сигнал, переданный из устройства О/Э}$$

$$= \Delta I_2 \cdot \sqrt{Z_0}$$

Приложение 1. Сигналы в оптоэлектронных устройствах (продолжение)

Интересно отметить, что вместо среднеквадратических значений в формулах фигурируют разностные токи и напряжения. Причина этого в том, что при описании оптических преобразователей мы имеем дело с модулированными сигналами, а в этом случае изменение оптической мощности пропорционально изменению электрического тока или напряжения. Общее прямое усиление системы определяется формулой:

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad (a_2 = 0)$$

$S_{12} = 0$ ► Предполагается отсутствие обратной передачи

Хотя общее усиление системы определяется как S-параметр, отдельные передаточные функции устройств Э/О и О/Э обычно определяются как чувствительность, поскольку используются сигналы в оптической и электрической областях, а применять S-параметры к оптическим сигналам неудобно. Изначально предполагается, что входной импеданс Э/О преобразователя и выходной импеданс О/Э преобразователя равен Z_0 (т. е. S_{11} и S_{22} равны нулю).

$$R_s = \frac{\Delta P_0}{\Delta I_i} = \text{чувствительность источника Э/О}$$

и

$$R_r = \frac{\Delta I_2}{\Delta P_0} = \text{чувствительность приёмника О/Э}$$

Используя приведённые выше уравнения, мы можем выразить S_{21} через чувствительности преобразователя R_s и R_r :

$$\begin{aligned} S_{21} &= \frac{b_2}{a_1} \\ &= \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \\ &= \frac{(R_r \cdot \Delta P)}{(\Delta P / R_s)} \\ &= (R_s \cdot R_r) \end{aligned}$$

Приложение 1. Сигналы в оптоэлектронных устройствах (продолжение)

Удобно представить функции преобразования в логарифмическом масштабе в децибелах. Усиление системы по мощности из источника Z_0 в нагрузку Z_0 можно выразить следующими уравнениями:

$$|a_1|^2 = \text{Мощность, падающая на Э/О}$$

$$|b_2|^2 = \text{Мощность, поступившая в нагрузку } Z_0$$

$$|S_{21}|^2 = \frac{|b_2|^2}{|a_1|^2}$$

$$= |R_s \cdot R_r|^2$$

$$= \text{Усиление системы по мощности}$$

$$20 \log_{10} |S_{21}| = \text{Усиление системы в дБ}$$

$$= 20 \log_{10} |R_s \cdot R_r|$$

Чувствительности R_s и R_r нужно привязать к некоторому значению, чтобы логарифмические величины имели определенный смысл, аналогично тому, как 0 дБ представляет единичное значение S_{21} или усиление равное 1. Затем чувствительность источника будет выражена в ваттах на ампер, что в децибелах будет соотносено с эффективностью преобразования 1 Вт/А. Аналогичным образом эффективность преобразования приёмника будет соотносена с 1 А/Вт.

$$20 \log_{10} |R_s \cdot R_r| = 20 \log_{10} \frac{R_s \text{ (Вт/А)}}{1 \text{ (Вт/А)}} \cdot \frac{R_r \text{ (А/Вт)}}{1 \text{ (А/Вт)}}$$

Теперь отдельные чувствительности можно представить индивидуально в децибелах:

$$R_s \text{ (дБ)} = 20 \log_{10} \frac{R_s \text{ (Вт/А)}}{1 \text{ (Вт/А)}}$$

Это позволяет представить исходные уравнения чувствительности в логарифмической форме:

$$R_s \text{ (дБ)} = 20 \log_{10} \frac{R_s \text{ (Вт/А)}}{1 \text{ (Вт/А)}}$$

Теперь измерения чувствительности опираются на способность АОК точно измерять мощность оптической модуляции (ΔP_0) и ток модуляции ($\Delta I_{1,2}$). Значение тока модуляции вычисляется по волновому сопротивлению системы и измеренной электрической мощности. Измерение мощности оптического модулированного сигнала опирается на «стандартный» оптический приёмник, параметры которого предопределены и известны АОК.

Приложение 2. Работа во временной области

Основные сведения

АОК выполняет измерения, перестраивая частоту модулирующего сигнала. Таким образом выполняются измерения в частотной области. Однако АОК может математически преобразовать результаты измерений в частотной области и представить её во временной области. Также можно оценить реакцию устройства на специальные сигналы, такие как «ступенька» или «импульс». Преобразование во временную область можно использовать при измерениях передачи и отражения, каждое из которых позволяет по-разному взглянуть на характеристики компонента.

Примечание. Поскольку отклик во временной области получается из частотной характеристики малого сигнала, он тоже даёт линейный прогноз для переходной и импульсной характеристики малого сигнала.

Чтобы использовать АОК для измерения импульсной характеристики, мы выполняем измерения на некоторых синусоидальных частотах. Процесс сложения этих дискретных синусоидальных составляющих математически выражается обратным дискретным преобразованием Фурье (DFT-1). Этот процесс преобразования использует сложный высокоскоростной алгоритм, который преобразует данные частотной области во временную область. Алгоритм рассчитывает эквивалент импульсной характеристики (режим «импульсного ФНЧ»), переходной характеристики (режим «ступенчатого ФНЧ») или ВЧ пакета (режим «полосового фильтра»). Результат, рассчитанный алгоритмом временной области, совпадает с результатом, который можно было бы получить с помощью измерительной системы (осциллографа, импульсного генератора и т. п.) с той же полосой и формой импульса.

Каждый из трёх режимов преобразования обладает своими достоинствами и недостатками. Переходная характеристика рассчитывается путём взятия интеграла от импульсной характеристики. Переходная характеристика не только даёт информацию о длительности фронтов и переходных процессов, но и может использоваться для определения типа неоднородностей (ёмкость, индуктивность и т. п.) во время измерения электрического отражения. Режимы переходной и импульсной характеристики требуют, чтобы частотные точки были гармонически связаны, и свивирование начиналось с основной частоты, чтобы можно было экстраполировать постоянную составляющую. (Анализатор цепей, используемый для АОК, имеет функцию «SET FREQ LOW PASS», которая использует гармонически связанные частотные точки.)

Приложение 2. Работа во временной области (продолжение)

Диапазон и разрешение

Измерительный диапазон

Измерительный диапазон описывает максимальный интервал времени (и, следовательно, максимальное расстояние), которое можно отобразить в рамках преобразования. Используемое математическое преобразование генерирует во временной области не отдельный импульс, а «последовательность импульсов». Поскольку через некоторое время импульсы повторяются, это приводит к возникновению «побочных» откликов. При этом за пределами свободного от побочных откликов диапазона невозможно определить, какой из импульсов является истинным откликом. Свободный от побочных откликов диапазон (в секундах) определяется уравнением: $AFR = (N-1)/\text{Полоса обзора}$, где 'N' – число точек измерения. Кроме того, неоднозначные результаты измерения получаются, когда сдвиг фазы в устройстве в пределах одного шага по частоте превышает 180 градусов.

Разрешение измерения

Разрешение измерения определяет способность АОК выделять отдельный отклик (в секундах) и описывается уравнением:

$$MR = \frac{(\text{Интервал времени})}{(N-1)}$$

где интервал измерения, это интервал времени, отображаемый на АОК (с активным преобразованием), а N – это число точек данных. С уменьшением интервала времени разрешение однократного измерения ограничивается точностью фазы прибора. Разрешение измерения (в секундах), связанное с погрешностью фазы, выражается уравнением:

$$MR = \left(\frac{(0,003 \cdot \text{Погрешность фазы (град.)})}{\text{Апертура (Гц)}} \right)$$

где апертура – это частотный диапазон измерения. Погрешность фазы зависит от типа выполняемого измерения, но обычно не превышает 2 градуса, что соответствует погрешности времени в субпикосекундном диапазоне и погрешности по расстоянию в субмиллиметровом диапазоне.

Приложение 2. Работа во временной области (продолжение)

Разрешения отклика

Разрешением отклика называется минимальное время (пропорциональное расстоянию) между двумя откликами, когда каждый отклик можно выделить и идентифицировать.

Табл. 2. Примерная взаимосвязь между полосой обзора по частоте и выбранным окном

Окно	Ступенчатый ФНЧ (от 10 % до 90 %)	Импульсный ФНЧ (50 %)	Полосовой фильтр
Минимум	0,45/полоса обзора	0,60/полоса обзора	1,20/полоса обзора
Норма	0,99/полоса обзора	0,98/полоса обзора	1,95/полоса обзора
Максимум	1,48/полоса обзора	1,39/полоса обзора	2,77/полоса обзора

Повышение точности измерений за счёт стробирования

Отраженные сигналы могут взаимодействовать с первичными сигналами, порождая погрешность измерения. Во временной области отражённый сигнал можно локализовать и математически компенсировать, повышая тем самым точность измерений. Для измерения параметров передачи устройств Э/О, О/Э, О/О и Э/Э свободная от отражений импульсная характеристика во временной области отображается одним событием. Если тестируемое устройство создаёт значительное отражение, то возникают дополнительные импульсы. Функция стробирования во временной области действует как «полосовой» фильтр времени, который пропускает первичный импульс и фильтрует импульсы, вызванные отражением. После «фильтрации» отражений измерение можно вернуть в частотную область. Отображаемая частотная характеристика будет выглядеть так, как будто отражённых сигналов больше нет.

Дополнительная информация об измерениях во временной области приведена в рекомендациях по применению AN1287-12³.

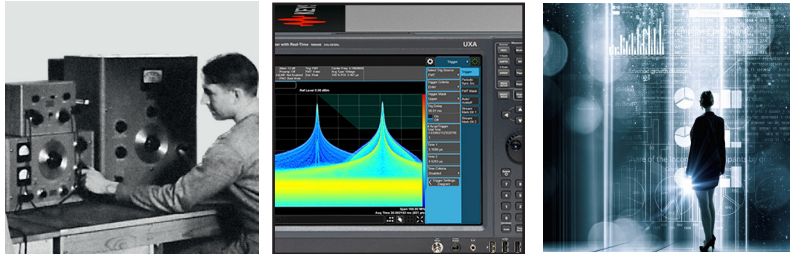
Литература

1. Анализатор оптических сигналов Keysight 71400, рекомендации по применению 371 (5954-9137E.pdf)
<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5954-9137E.pdf>
2. Фундаментальные принципы векторного анализа цепей, рекомендации по применению 1287-1 (5965-7707E.pdf)
<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5965-7707E.pdf>
3. Анализ во временной области с помощью анализатора цепей, рекомендации по применению 1287-12 (5989-5723EN.pdf)
<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-5723EN.pdf>

Развиваемся с 1939 года

Уникальное сочетание наших приборов, программного обеспечения, услуг, знаний и опыта наших инженеров поможет вам воплотить в жизнь новые идеи. Мы открываем двери в мир технологий будущего.

От Hewlett-Packard и Agilent к Keysight.



myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

Персонализированная подборка только нужной вам информации.

http://www.keysight.com/find/emt_product_registration

Зарегистрировав свои приборы, вы получите доступ к информации о состоянии гарантии и уведомлениям о выходе новых публикаций по приборам.

KEYSIGHT SERVICES
Accelerate Technology Adoption.
Lower costs.

Услуги ЦСМ Keysight

www.keysight.com/find/service

Центр сервиса и метрологии Keysight готов предложить вам свою помощь на любой стадии эксплуатации средств измерений – от планирования и приобретения новых приборов до модернизации устаревшего оборудования. Широкий спектр услуг ЦСМ Keysight включает услуги по поверке и калибровке СИ, ремонту приборов и модернизации устаревшего оборудования, решения для управления парком приборов, консалтинг, обучение и многое другое, что поможет вам повысить качество ваших разработок и снизить затраты.



Планы технической поддержки Keysight

www.keysight.com/find/AssurancePlans

ЦСМ Keysight предлагает разнообразные планы технической поддержки, которые гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.

Торговые партнеры Keysight

www.keysight.com/find/channelpartners

Получите лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерений и широкий ассортимент решений компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнерами.

www.keysight.com/find/lca

Российское отделение
Keysight Technologies

115054, Москва, Космодамианская наб., 52,
стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973954

8 800 500 9286 (Звонок по России бесплатный)

Факс: +7 (495) 7973902

e-mail: tmo_russia@keysight.com

www.keysight.ru

Сервисный Центр
Keysight Technologies в России

115054, Москва, Космодамианская наб., 52,
стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973930

Факс: +7 (495) 7973901

e-mail: tmo_russia@keysight.com

(BP-16-10-14)



www.keysight.com/go/quality

Keysight Technologies, Inc.

Сертифицировано DEKRA на соответствие
стандарту ISO 9001:2015
Система управления качеством