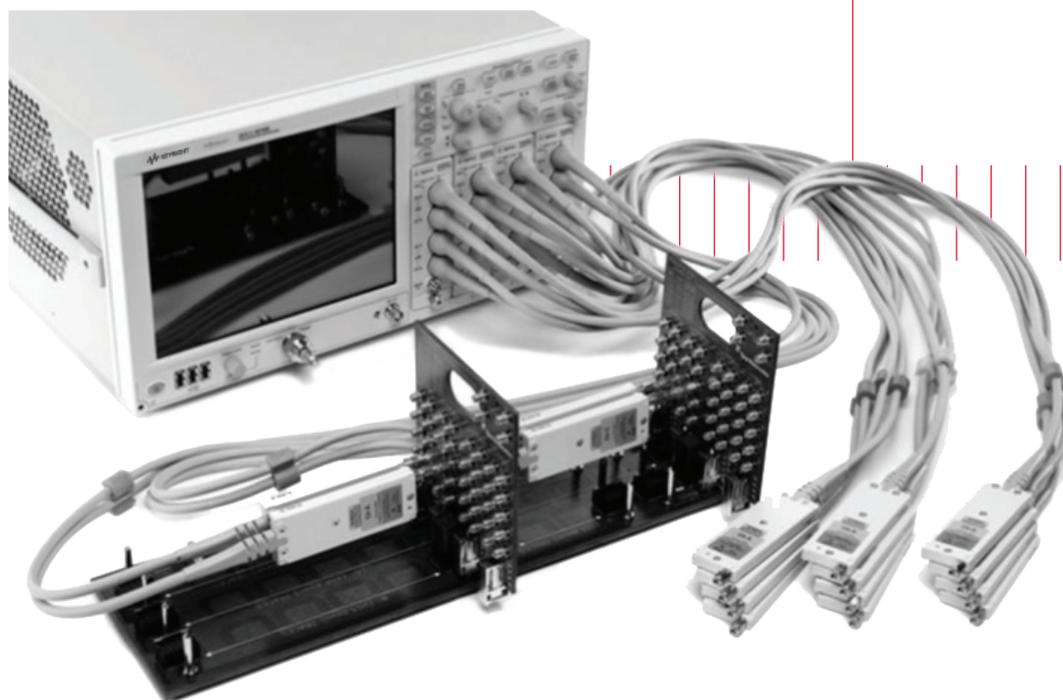


# Keysight Technologies

Высокоточная рефлектометрия  
во временной области (TDR)

Рекомендации  
по применению



## Введение

Для достижения высоких характеристик систем связи требуется обеспечить высокое качество линий передачи электрических сигналов. В целях эффективной передачи и сохранения высоких показателей целостности сигналов, импеданс (комплексное сопротивление) в каждом отдельно взятом поперечном сечении и волновое сопротивление на всей протяженности линии передачи должны быть постоянными величинами, как можно ближе к номиналу данной линии. Рефлектометрия во временной области (TDR) – хорошо зарекомендовавший себя и детально проработанный метод измерений импеданса и оценки качества сигнальных трактов, объединяющих отдельные компоненты устройств в единое целое, элементов соединения и линий передачи сигналов.

С увеличением скорости передачи сигналов и уменьшением геометрических размеров отдельных компонентов, точности и разрешения базовых TDR-систем может быть недостаточно. В настоящих рекомендациях по применению будут рассмотрены возможности таких систем и их ограничения, а также основные источники погрешностей измерений. Кроме того, описаны практические методы выполнения измерений и полезные методики повышения их точности.

Рассмотрены следующие вопросы:

- методы устранения влияния параметров оснастки и измерительных приспособлений (кабельных сборок и соединительных устройств, затрудняющих оценку действительных параметров исследуемых устройств);
- методы высокоточных измерений параметров дифференциальных линий передачи с использованием TDR;
- оценка S-параметров одно-, двух- или четырехпортовых устройств для наилучшего понимания поведения устройства и более эффективного его моделирования.

Методы достижения максимально возможных точности и разрешения при измерениях импеданса для оценки целостности сигналов

## Основы измерений с использованием метода рефлектометрии во временной области

Когда сигнал «запускают» по линии передачи, в идеальном случае никакая часть его энергии не должна вернуться в источник в виде отраженного сигнала, вся энергия сигнала должна быть перенесена в пункт назначения. Так происходит, когда импеданс по всей длине линии передачи и ее нагрузки равен выходному импедансу источника сигналов. Однако, если сигнал сталкивается с неоднородностью в тракте, вызывающей локальное изменение величины импеданса, часть его энергии отразится.

Временной рефлектометр (TDR) – это измерительный прибор, используемый для измерений временной зависимости (профиля) импеданса исследуемого устройства (ИУ) или компонента. Принцип измерений прост. С помощью генератора ступенчатого сигнала (ГСТС) в цепи формируется перепад напряжения с малым временем нарастания фронта. Если в тракте передачи сигнала от источника к нагрузке присутствуют неоднородности, вызывающие локальное изменение импеданса, часть энергии сигнала отразится (отраженная волна) обратно и тоже будет зафиксирована осциллографом на входе тракта. Расстояние до неоднородности может быть определено, исходя из разности временных отсчетов прихода падающей и отраженной волн на вход тракта, зафиксированных осциллографом (с учетом коэффициента замедления волны в тракте от источника до ИУ). Модуль коэффициента отражения неоднородности может быть вычислен, как отношение амплитуд падающей и отраженной волн. Данный метод напоминает радиолокацию, только внутри тракта, и позволяет выявить все локальные изменения импеданса в тракте. Существуют методики анализа, позволяющие определить характер выявленных в тракте неоднородностей (резистивный, индуктивный или емкостной), а также чем вызваны потери – последовательным или параллельным (шунтирующим) элементом тракта. Вся эта информация присутствует в режиме реального времени на экране осциллографа. Поскольку спектр ступенчатого сигнала довольно широк (зависит от времени нарастания фронта), TDR предоставляет значимую информацию о широкополосном отклике системы, в отличие от методов частотной рефлектометрии, основанных на исследовании отклика в фиксированном частотном диапазоне.

Примеры конфигурации оборудования для измерений по методу TDR и полученных результатов показаны на рисунке 1.

Для более глубокого изучения основ TDR вы можете обратиться к рекомендациям по применению компании Keysight Technologies, Inc. «Теория рефлектометрии во временной области».

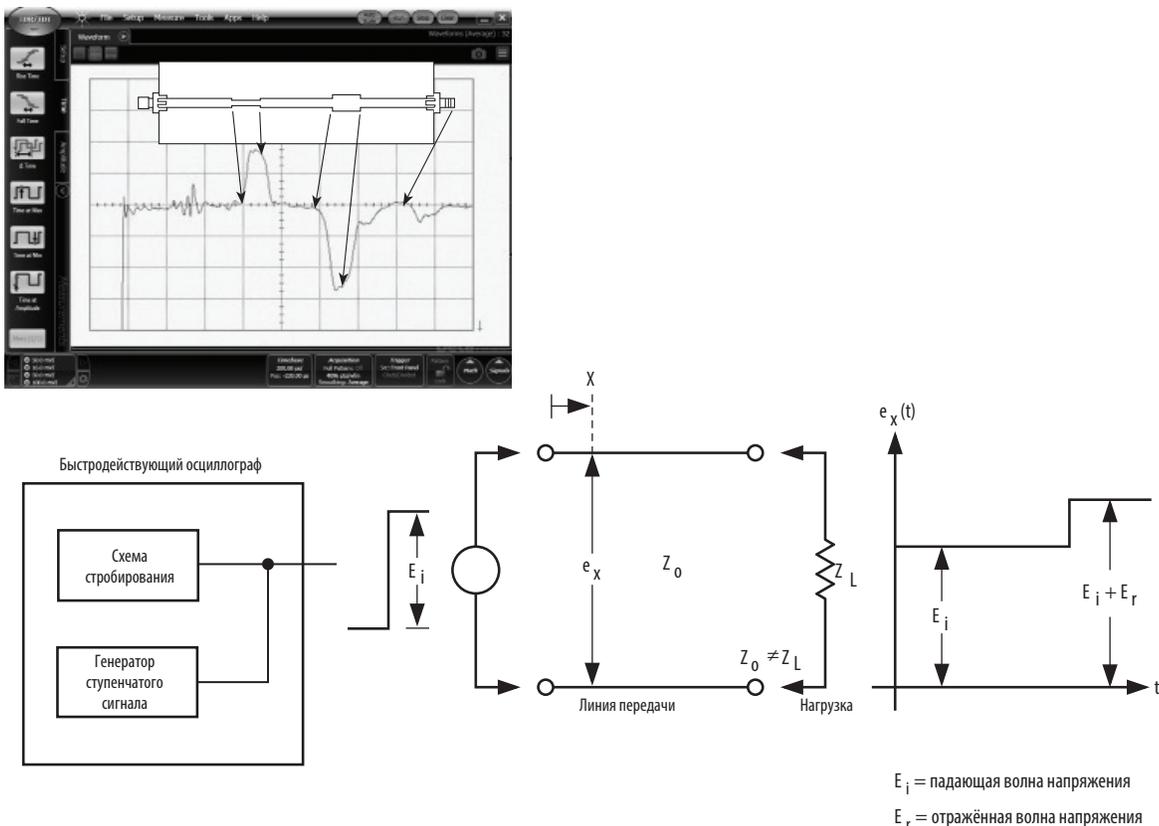


Рисунок 1. Базовые принципы TDR.

## Пределы измерительных возможностей рефлектометра

Измерительные возможности рефлектометра определяются его основными техническими характеристиками. Рассмотрим некоторые из факторов, которые диктуют общие метрологические характеристики рефлектометра:

### Генератор ступенчатого сигнала как источник погрешностей

Форма сигнала, формируемого генератором ступенчатого сигнала (ГСТС), крайне важна для точных TDR/TDT измерений. В отклике ИУ отразятся все особенности входного воздействия, не только сам ступенчатый перепад, но и его искажения, такие как выброс по фронту и неравномерность.

Если выброс по фронту значителен, то отклик ИУ будет трудно интерпретировать. Локальные неоднородности в структуре тракта, вызывающие отклонения величины импеданса, наблюдаются, как изменения в отраженном сигнале. Искажения формы ступенчатого сигнала ГСТС могут быть ошибочно интерпретированы на экране рефлектометра, как неоднородности в структуре ИУ. Чем ближе форма ступенчатого сигнала к идеальной, тем меньше догадок придется строить при анализе результатов измерений. Кроме того, крайне важное значение имеет время нарастания фронта ступенчатого сигнала. Следует помнить, что время нарастания фронта определяет верхнюю частоту спектра ступенчатого сигнала. Таким образом, если вас интересует, как ИУ будет вести себя в реальных условиях эксплуатации, необходимо обеспечить при измерениях такое время нарастания фронта сигнала, которое будет соответствовать верхней частоте его рабочего диапазона.

Скорость нарастания фронта также критична, когда рефлектометр используется для определения расстояния до неоднородности в линии передачи. На точность измерений влияет не только время нарастания фронта сигнала ГСТС, но и полоса пропускания осциллографа. Обобщенная характеристика рефлектометра, называемая системным временем нарастания фронта сигнала, складывается из показателей времени нарастания ГСТС и осциллографа. Она может быть приближенно рассчитана с использованием формулы 1:

Формула 1: 
$$t_{r \text{ системы}} = \sqrt{t_{r \text{ ГСТС}}^2 + t_{r \text{ осциллографа}}^2}$$

Реальный рефлектометр будет иметь конечное время нарастания фронта сигнала, что равнозначно установке на его вход фильтра нижних частот (ФНЧ). Если рефлектометр будет слишком медленно реагировать на динамические изменения сигнала, то он может исказить или вовсе не выявить отклик, характеризующий истинную природу неоднородности. В действительности рефлектометр может быть слишком быстр и давать результаты, не применимые на практике. (Как правило, измеренная величина модуля коэффициента отражения (КО) будет изменяться с изменением времени нарастания фронта сигнала, поскольку она частотно-зависима. Это хорошо заметно, когда измерения КО или возвратных потерь выполняются с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ). При измерениях частотной зависимости КО нередко можно наблюдать, что с ростом частоты модуль КО ИУ возрастает.) На рисунке 2 приведены результаты измерений параметров перехода SMA – BNC (50 Ом). Следует отметить, что по мере уменьшения времени нарастания фронта ступенчатого сигнала, характер поведения ИУ, предназначенного для использования при высоких скоростях передачи данных, становится более очевидным. При времени нарастания фронта сигнала 100 пс на рефлектограмме наблюдается только один максимум, соответствующий величине импеданса примерно 56 Ом. Когда время нарастания фронта уменьшается до 35 пс (скорость

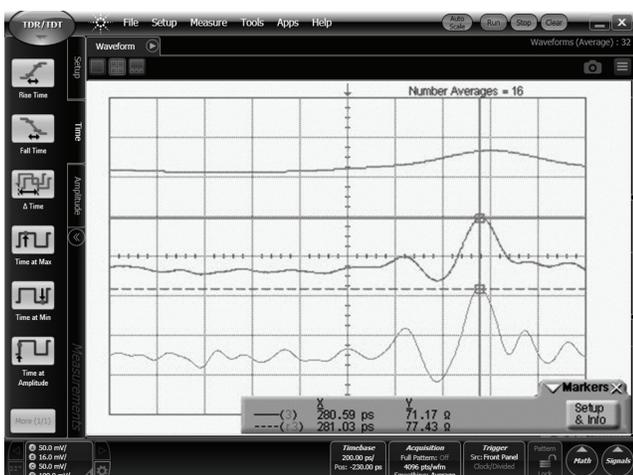


Рисунок 2. Рефлектограммы для различных значений времени нарастания фронта ступенчатого сигнала.

увеличивается), становится очевидно, что неоднородностей несколько, и максимальная из них имеет импеданс 71 Ом. При дальнейшем уменьшении времени нарастания до 20 пс импеданс этой неоднородности увеличивается до 77 Ом. В случае трех этих измерений, результат, полученный при времени нарастания фронта сигнала 20 пс, не применим для перехода, через который на практике проходят сигналы, с временем нарастания фронта не менее 100 пс. Следовательно, параметры данного перехода следует измерять при времени нарастания фронта ступенчатого сигнала 100 пс, а не 20 пс. С другой стороны, если система работает при скоростях передачи данных 10 Гбит/с или более, то в ней могут формироваться сигналы с временем нарастания фронта менее 30 пс, а компоненты для систем со скоростями передачи данных порядка 40 Гбит/с могут обрабатывать сигналы с временем нарастания фронта менее 10 пс. Таким образом, гибкость в выборе времени нарастания фронта ступенчатого сигнала временного рефлектометра очень полезна, когда приходится проводить измерения параметров элементов и узлов систем, функционирующих при различных скоростях передачи данных.

При решении задач анализа целостности сигналов или причин возникновения отказов часто требуется среди нескольких близко расположенных неоднородностей выделить и точно локализовать только одну. Рефлектометр способен разрешить две неоднородности, если сигнал проходит расстояние между ними за время приблизительно равное половине системного времени нарастания фронта ступенчатого сигнала. Высокоточные рефлектометры имеют системное время нарастания фронта (совокупное для ГСТС и осциллографа) менее 10 пс. При измерениях в линиях, заполненных диэлектриком с диэлектрической проницаемостью примерно равной 1 (воздушные линии), это соответствует разрешающей способности по расстоянию примерно 1,5 мм. (См. раздел «Использование сигналов с очень малым временем нарастания фронта для высокоточных измерений параметров близко расположенных неоднородностей».) Материал подложки типовых печатных плат имеет диэлектрическую проницаемость порядка 4. В этих условиях разрешение улучшается и будет менее 1 мм (эта величина будет больше, если электромагнитные поля линии передачи распределены не только в диэлектрике печатной платы, но и в воздухе). Следует отметить, что кабели, соединители и переходы низкого качества (будут рассмотрены ниже) также могут увеличивать общее системное время нарастания фронта сигнала рефлектометра и ухудшать разрешающую способность при разделении двух неоднородностей.

### Кабели, соединители и переходы вызывают потери и переотражения

Кабели, соединители и переходы между ГСТС, ИУ и осциллографом могут существенно повлиять на результат измерений. Рассогласование по величине импеданса и неидеальность соединения сами по себе являются неоднородностями и вызывают переотражения, не связанные с ИУ. Они могут исказить отраженный сигнал и затруднить анализ неоднородностей непосредственно относящихся к ИУ.

Кроме того, с ростом частоты характеристики неидеальных кабелей и элементов соединения еще более ухудшаются. Потери в кабелях, возрастающие с частотой, увеличивают время нарастания фронта ступенчатого сигнала и скругляют его края. Таким образом, рассмотренные выше недостатки ГСТС могут быть усугублены кабелями, которые способны значительно ухудшить характеристики даже самого хорошего ГСТС. Рисунок 3 наглядно показывает, как кабели, соединители и переходы влияют на качество TDR/TDT измерений. Отклик с наименьшим временем нарастания фронта соответствует отражению ступенчатого сигнала от меры короткого замыкания (КЗ), подключенной непосредственно ко входу рефлектометра. (Напоминаем, что сигнал ГСТС должен полностью отразиться от плоскости КЗ с поворотом фазы на 180 градусов,

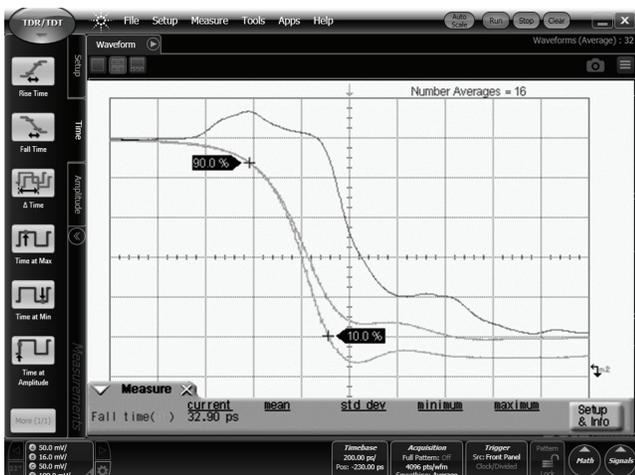


Рисунок 3. Как кабели и соединители могут ухудшить характеристики рефлектометра.

но для этого он должен пройти через все кабели и элементы соединения туда и обратно). Второй по скорости нарастания ступенчатый сигнал соответствует мере КЗ, подключенной через высококачественный кабель длиной 1 м. Третий отклик – мера КЗ на конце дешевого кабеля с соединителями типа SMA длиной 0,6 м. Рассмотрев данный пример, мы можем установить важный факт – кабели и элементы соединения могут ухудшить точность результатов измерений, полученных с помощью временного рефлектометра.

## Методы минимизации влияния измерительных приспособлений и оснастки

Если рефлектометр имеет вынесенные детекторные головки, которые можно подключать непосредственно ко входу ИУ (без переходов и кабелей), то это может значительно уменьшить систематическую погрешность измерений, но не устранить ее вовсе. Кроме того, для подключения к ИУ могут быть необходимы пробники, переходы или некоаксиальные кабели. В этом случае результаты измерений могут быть ухудшены из-за паразитных переотражений и потерь в них. Поскольку данные механизмы возникновения погрешностей измерений неизменны и систематичны, в целях повышения точности результатов измерений представляется возможным использовать различные методы калибровки, уменьшающие влияние указанных источников погрешностей.

Один из таких методов – это вычитание сигнала (компарирование по методу сравнения с мерой). Данный метод заключается в подключении ко входу системы идеального ИУ (образцовой меры с известными параметрами) и фиксации его отклика. При последующих измерениях параметров ИУ сохраненный отклик идеального ИУ будет вычитаться из текущих результатов измерений. Любые расхождения будут отражать отличия подключенного ИУ от идеального. Систематические погрешности измерений в данном случае тоже будут вычитаться, а поскольку при двух измерениях их порядок одинаковый, они будут эффективно устранены. Это простой и удобный метод повышения точности измерений, но он имеет несколько значительных ограничений. Первое – наличие идеального (или хорошо известного) образцового ИУ. Получить такое может быть просто невозможно или сложно. Второе – все полученные результаты измерений будут относительными. Получить по ним абсолютные значения характеристик ИУ будет непросто. Наконец, ступенчатый сигнал, поступающий на вход ИУ может быть значительно искажен. Даже если этот эффект одинаков для образцового и исследуемого устройств, он может существенно ограничить измерительные возможности рефлектометра.

Другая методика основана на оценке собственных характеристик измерительной системы за счет использования прецизионных калибровочных мер или устройств с известными параметрами. В отличие от предыдущего метода, когда калибровка дает образцовую характеристику, вычитаемую из измеренной, данный метод позволяет оценить составляющие систематической погрешности самого рефлектометра и ввести постоянную поправку (коррекцию) на их величину для всех получаемых результатов измерений. Такая процедура обычно называется калибровкой временного рефлектометра – это простой, элегантный и универсальный метод, предоставляющий широкие возможности для получения высокоточных результатов измерений.

Реализация данного метода довольно проста, всего за несколько шагов вы сможете добиться высокой точности измерений, что и является его основным преимуществом. При калибровке измерения выполняются со всеми кабелями и переходами, только вместо ИУ подключаются калибровочные меры, в сравнении с которыми и будет оцениваться вся измерительная система. На первом этапе калибровки производится коррекция составляющих систематической погрешности измерений, вызванных рассинхронизацией ГСТС и осциллографа, перекрестными помехами в каналах, а также переотражениями в кабелях и элементах соединения. Вместо ИУ к измерительной системе подключается электронный калибровочный модуль или высококачественные калибровочные меры для создания режимов короткого замыкания (КЗ), холостого хода (ХХ) и согласованной нагрузки (СН). По результатам измерений в этих трех режимах нагрузки определяются собственные параметры временного рефлектометра.

При этом параметры высококачественных модулей электронной калибровки или калибровочных мер должны быть известны (чаще всего из документации производителя). В процессе калибровки рефлектометра эти параметры используются, как ожидаемый результат измерений (т.е. результат, который мы бы получили, если бы наш рефлектометр был идеальным). Любые расхождения между полученными и ожидаемыми результатами измерений параметров мер относятся на счет собственных параметров (неидеальности) рефлектометра и будут скорректированы посредством цифровой фильтрации. Вот почему так важно использовать для калибровки высококачественные меры с хорошо известными параметрами. Если коррекция с использованием цифровых фильтров будет применена на основании результатов измерений неисправных калибровочных мер или действительные параметры мер не соответствуют приписанным значениям, то такая калибровка не устраним, а внесет дополнительные погрешности.

## Формирование характеристик цифровых фильтров

На втором этапе калибровки формируются характеристики цифровых фильтров. Это происходит автоматически, без участия оператора. Цифровые фильтры призваны скомпенсировать все отклонения реальной частотной характеристики измерительной системы от идеала. После применения калибровки, при повторном подключении калибровочной меры к рефлектометру в плоскости калибровки ее измеренные характеристики должны в точности соответствовать ожидаемым (приписанным). Фильтр корректирует составляющие систематической погрешности измерений за счет внесения ослабления, дополнительного усиления или фазового сдвига для определенных участков амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик (АЧХ и ФЧХ) рефлектометра, по необходимости. Рассмотрим, к примеру, выброс по фронту ступенчатого сигнала. Без калибровки на частотной характеристике ИУ будет проявляться и характеристика выброса. При калибровке фильтр будет сформирован таким образом, чтобы ослабить и внести дополнительный фазовый сдвиг на частотах, на которых проявляется воздействие выброса по фронту ступенчатого сигнала, за счет чего характеристика ИУ будет скомпенсирована на величину этого выброса. Аналогично фильтр будет работать и при коррекции потерь в кабеле, увеличивающихся с ростом частоты.

Цифровой фильтр, формируемый при калибровке, также позволяет корректировать эффективное время нарастания фронта сигнала ГСТС. За счет этого нарастание фронта ступенчатых сигналов рефлектометров компании Keysight может быть замедлено или ускорено для имитации быстро или медленно изменяющихся электрических сигналов реальных цепей. В рефлектометрах компании Keysight серии 86100 пользователь, устанавливая время нарастания фронта сигнала, по сути задает полосу пропускания цифрового фильтра. Уменьшение полосы пропускания приводит к ослаблению спектральных составляющих с частотами, лежащими за пределами нужной полосы. Увеличение полосы следует рассмотреть подробнее. Чтобы увеличить полосу пропускания, нужно усилить спектральные составляющие за пределами исходной полосы пропускания по уровню – 3 дБ. Хотя это и верный шаг, но следует помнить, что шум на этих частотах и на ближайших к ним более высоких частотах тоже будет усилен. Предел, до которого время нарастания фронта сигнала в реальной системе может быть уменьшено, определяется уровнем собственных шумов. В реальных измерительных системах существует точка, за которой определенные участки измеряемой АЧХ уже будут ниже уровня собственных шумов. Дальнейшее расширение полосы пропускания только увеличит уровень шума и приведет к получению недостоверных результатов измерений. Поскольку уровень собственных шумов может быть уменьшен с помощью усреднения от цикла к циклу, в случае применения калибровки следует использовать эту функцию, особенно при уменьшении времени нарастания фронта ступенчатого сигнала.

## Примеры измерений:

В примере, приведенном на рисунке 4 и описанном ниже, используется простая линия передачи, выполненная на печатной плате. На данной линии имеется две характерные области, у одной из которых импеданс увеличен относительно основной линии (более узкая часть), а у второй уменьшен (более широкая часть). Еще одна линия, точная копия первой, включена последовательно с ней. В идеальном случае измеренная характеристика второй линии тоже должна быть точной копией характеристики первой. Однако, переотражения и ослабление сигнала в первой линии существенно искажают результат измерений второй, как показано ниже.

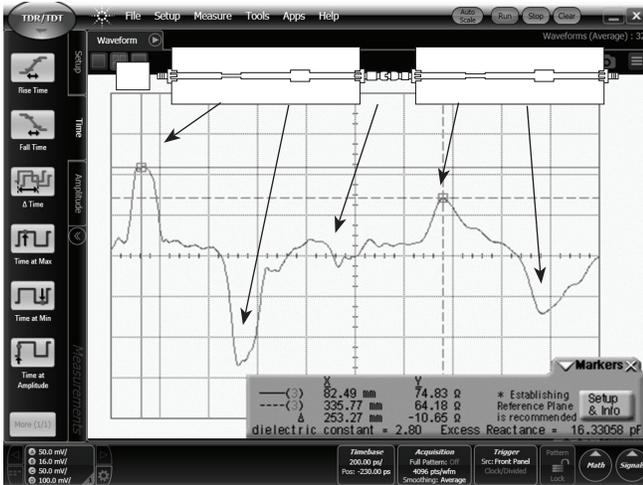


Рисунок 4. Рефлектограмма, полученная по результатам измерений двух идентичных включенных последовательно линий передачи с помощью рефлектометра. Линии имеют участки с разными величинами импеданса.

На рисунках 5 и 6 раздельно показаны результаты измерений двух этих последовательно включенных идентичных линий, первой и второй по направлению движения падающей волны, соответственно. Заметьте, что результаты измерений второй линии, не смотря на ее идентичность первой, сильно ослаблены и смазаны по сравнению с результатами первой. Данный пример наглядно показывает, насколько сильно кабели и элементы измерительной оснастки, используемые для подключения к ИУ, способны исказить временную рефлектограмму ИУ.

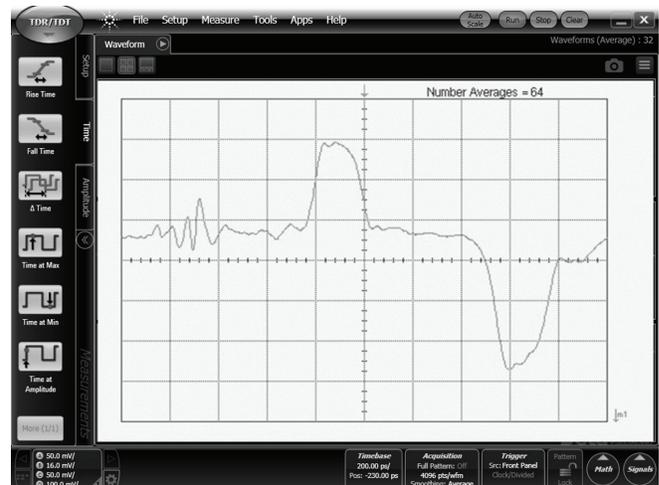


Рисунок 5. Рефлектограмма первой печатной платы.

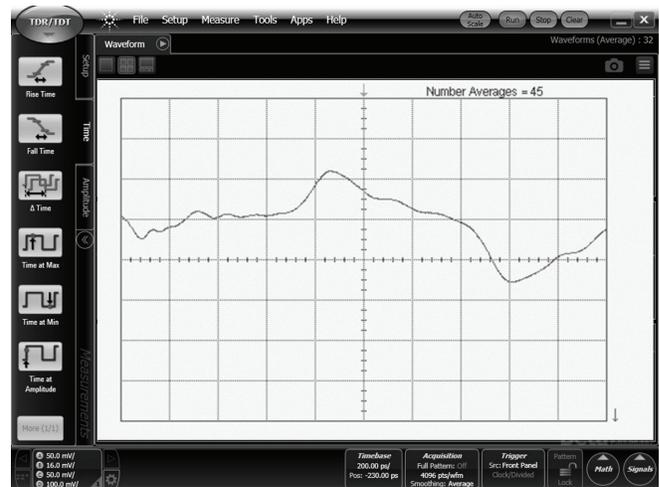


Рисунок 6. Рефлектограмма второй печатной платы.

Калибровка может существенно улучшить результаты измерений. Отключим вторую исследуемую линию от первой и получим возможность подключить на ее место образцовые калибровочные меры КЗ и СН. Место их подключения далее будет считаться опорной плоскостью калибровки. Процедура калибровки позволяет скомпенсировать составляющие систематической погрешности измерений (в том числе переотражения и потери в первой линии) до этой плоскости.

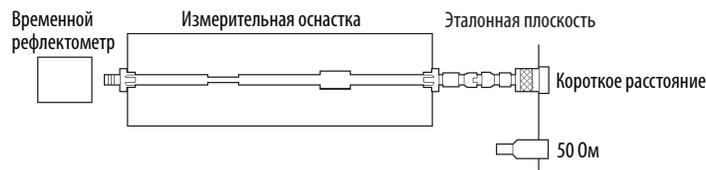


Рисунок 7. Схема калибровки.

После завершения калибровки взглянем еще раз на результаты измерений второй линии. Налицо два изменения, связанные с устранением влияния первой линии на результат измерений. Во-первых, на экране рефлектометра мы наблюдаем характеристику только одной линии – второй. Во-вторых, потери и переотражения в первой линии были скомпенсированы и больше не влияют на результат измерений второй линии. Теперь результат измерений второй линии превосходно коррелирует с результатом измерений почти идентичной первой линии, показанным на рисунке 5.

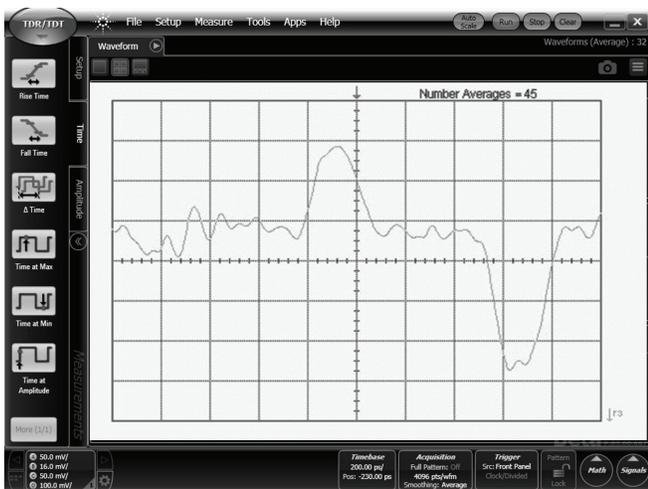


Рисунок 8. Влияние параметров измерительной оснастки на результат измерений устранено посредством калибровки.

Калибровка обеспечивает значительное улучшение результатов измерений параметров компонентов, когда ИУ не является коаксиальным устройством. Хороший пример – измерения на печатной плате с использованием пробника. Для использования рефлектометра требуется обеспечить подключение его коаксиального выхода к некоаксиальному входу ИУ. Используемые для этого переходы и измерительные приспособления искажат действительные характеристики некоаксиального ИУ. Однако, проблему можно значительно уменьшить за счет калибровки. Ее можно выполнить, когда имеется возможность создать режимы КЗ и СН в тракте, аналогичном рабочему тракту ИУ. Например, для компенсации влияния параметров пробника на результат измерений используются специальные меры для пробника.

Второе преимущество калибровки заключается в возможности регулировки эффективного времени нарастания фронта ступенчатого сигнала. Мы обсуждали это выше и пришли к выводу, что время нарастания фронта должно соответствовать реальному режиму работы ИУ. Результаты TDR-измерений должны быть применимы и полезны при дальнейшем использовании компонента.

Калибровка предоставляет удобный способ для оценки параметров компонента (в частности его импеданса) при различных скоростях передачи данных. Для более глубокого изучения вопросов, связанных с калибровкой рефлектометра обратитесь к рекомендациям по применению компании Keysight 5988-2490EN «Качественное улучшение результатов TDR/TDT измерений с использованием нормализации».

Таким образом, основными преимуществами процедуры калибровки являются:

- устранение переотражений между рефлектометром и элементами соединения, посредством которых он подключен к ИУ;
- компенсация изъянов в форме сигнала ГСТС (выброса по фронту и «звона»);
- возможность регулировки времени нарастания фронта ступенчатого сигнала;
- компенсация потерь в кабелях и элементах соединения до плоскости калибровки.

## Использование сигналов с очень малым временем нарастания фронта для высокоточных измерений параметров близко расположенных неоднородностей

При измерениях во временной области, по мере того, как физическое расстояние между неоднородностями уменьшается, их отклики могут слиться в один общий отклик. Разрешающая способность временного рефлектометра, т.е. способность различить два близко расположенных отклика, определяется временем нарастания фронта сигнала ГСТС и полосой пропускания осциллографа. Как упоминалось ранее, эмпирическое правило здесь таково: временной рефлектометр способен разрешить две неоднородности если сигнал проходит расстояние между ними за время приблизительно равное половине системного времени нарастания фронта ступенчатого сигнала. Для интуитивного понимания данного правила рассмотрим микрополосковую линию, у которой импеданс ступенчато изменяется с 50 до 60 Ом и затем обратно до 50 Ом. Поскольку в линии присутствуют два ступенчатых перепада импеданса, должно быть и два четких перехода уровней на рефлектограмме. При какой длине участка линии с импедансом 60 Ом уже нельзя будет отдельно выделить каждый из этих переходов? Рефлектограмма будет идти на уровне 50 Ом до тех пор, пока не произойдет переход на участок с импедансом 60 Ом. Поскольку импеданс изменяется в большую сторону, отраженный сигнал придет в фазе и уровень рефлектограммы станет выше. Время, которое потребуется для достижения уровня 60 Ом равно времени нарастания фронта ступенчатого сигнала ГСТС. Далее рефлектограмма будет оставаться на уровне 60 Ом, пока не произойдет обратный переход на участок с импедансом 50 Ом. Для обратной смены уровня рефлектограммы опять же потребуется время, равное времени нарастания фронта сигнала ГСТС.

По мере того, как участок с импедансом 60 Ом будет становиться короче, переходы от 50 до 60 Ом и обратно по временной шкале будут все ближе друг к другу. Когда переход от уровня 60 Ом к уровню 50 Ом будет начинаться одновременно с окончанием перехода от 50 Ом к 60 Ом, тогда и можно считать, что достигнута минимальная длина участка с импедансом 60 Ом, при которой можно измерить расстояние до неоднородности и ее импеданс. Если расстояние между этими неоднородностями продолжать уменьшать, то ступенчатый сигнал не будет иметь достаточно времени, чтобы достичь полной амплитуды, и величина импеданса будет измеряться с погрешностью.

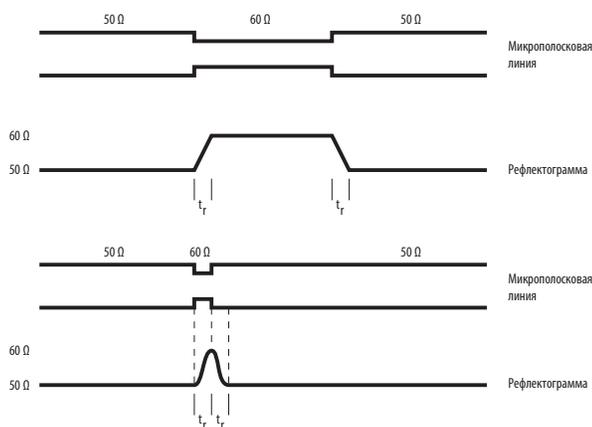


Рисунок 9. Определение минимального разрешения по шкале времени, необходимого для разделения двух близких неоднородностей в линии.

Таким образом, на экране рефлектометра «временной интервал» между позициями двух неоднородностей может быть рассчитан, как разность между отметками времени, где начался первый переход (из-за изменения импеданса с 50 до 60 Ом) и началом второго перехода (из-за смены импеданса с 60 до 50 Ом, в этом случае начало спуска рефлектограммы). На экране этот интервал равен времени нарастания фронта ступенчатого сигнала. Однако, следует помнить, что время, отображаемое на экране временного рефлектометра, показывает продолжительность пути сигнала до неоднородности и обратно. Следовательно и рассчитанный нами интервал – это время, которое потребовалось сигналу на прохождение прямого и обратного пути. Значит минимальное расстояние между неоднородностями – это расстояние, которое проходит сигнал за половину системного времени нарастания ступенчатого сигнала. Минимальное физическое расстояние определяется скоростью распространения сигнала в среде и системным временем нарастания фронта:

Формула 2: 
$$\frac{c \cdot t_{\text{нарастания}}}{2\sqrt{\epsilon}}$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $c$  – скорость света в вакууме.

Эффективная полоса пропускания системы и скорость нарастания фронта сигнала могут быть увеличены посредством калибровки, как описывалось выше. Таким образом, разрешающая способность при необходимости разделения откликов двух неоднородностей тоже может быть увеличена за счет калибровки.

## Высокоточные измерения параметров дифференциальных линий передачи с использованием рефлектометра

Скорость передачи данных в радиотехнических системах продолжает расти и для сохранения целостности сигналов в них все чаще используют дифференциальные линии передачи. Дифференциальная линия передачи состоит из двух взаимосвязанных линий, по которым передается два одинаковых по модулю, но противоположных по фазе (знаку) сигнала. Полезным (информативным) сигналом считается разность этих двух сигналов, отсюда и название – дифференциальный сигнал. Для измерения импеданса и других параметров, а также оценки качества дифференциальной линии передачи с точки зрения ее однородности требуется подать входное воздействие на оба ее плеча. Кроме того, когда речь идет об оценке характеристик электромагнитно связанных линий передачи, требуется провести соответствующий анализ и постобработку результатов измерений для получения параметров (в частности импеданса) такой связанной системы, а не отдельно взятой однопроводной линии.

Наиболее очевидным при решении измерительной задачи исследования характеристик дифференциальных линий передачи или компонентов представляется использование рефлектометра на основе комплементарной пары ГСТС. В такой системе один ГСТС будет формировать положительный ступенчатый сигнал для «положительного» плеча дифференциальной линии, а второй ГСТС – отрицательный ступенчатый сигнал для «отрицательного» плеча. Измеренное значение дифференциального импеданса в таком случае можно будет рассчитать из отношения отраженной волны дифференциального напряжения к падающей волне. (Дифференциальное напряжение определяется, как разность потенциалов между положительным и отрицательным плечами дифференциальной линии, а дифференциальный импеданс рассчитывается, как отношение дифференциального напряжения к току в линии. Если дифференциальная линия сбалансирована, то токи в положительном и отрицательном плечах равны по модулю и противоположны по направлению).

Для обеспечения высокоточных TDR-измерений параметров дифференциальных устройств рефлектометр должен соответствовать определенным жестким требованиям. Любая асимметрия двух плеч измерительной системы потенциально может стать причиной дисбаланса или погрешностей измерений. Асимметрия в дифференциальной системе – одна из основных причин перехода из чисто дифференциального в смешанный режим работы, то есть появления синфазной составляющей сигнала. Выделяются следующие источники погрешностей измерений:

- взаимная рассинхронизация двух ГСТС;
- взаимная рассинхронизация двух приемников (осциллографов);
- асимметрия формы сигналов двух ГСТС, как по амплитуде, так и по форме;
- различия в АЧХ приемников (осциллографов).

Основой для высокоточного измерительного решения может послужить только тщательно проработанное с конструктивной точки зрения измерительное оборудование. Кроме того, при TDR-измерениях параметров дифференциальных устройств также требуется выполнять аналогичную рассмотренной ранее процедуру калибровки, которая поможет скорректировать составляющие систематической погрешности измерений и предоставит описанные выше возможности. Выполнив все перечисленные требования, в конечном результате вы добьетесь наивысшей точности при TDR-измерениях параметров дифференциальных устройств.

Временные рефлектометры 86100 позволяют осуществлять коррекцию асимметрии ГСТС и приемников. Важно понимать, как это реализовано и какое влияние оказывает на результаты измерений. При исследовании параметров дифференциальной линии передачи критически важно точно выровнять и поддерживать достигнутую симметрию сигналов двух ГСТС. Первый ГСТС может быть настроен таким образом, чтобы формировать сигнал позже или раньше второго ГСТС рефлектометра.

Приемник рефлектометра также может быть настроен для осуществления выборки данных в произвольный момент времени относительно наступления события запуска ГСТС (данное событие будет использоваться, как точка отсчета при выборке данных). Таким образом, путем настройки момента времени выборки приемника рефлектометра отраженный сигнал в одном канале фактически может быть смещен по оси времени относительно другого канала. На практике это позволяет выровнять друг относительно друга отраженные сигналы и устранить любую асимметрию системы.

Например, если длины кабелей, по которым подаются сигналы двух ГСТС на вход ИУ, не одинаковы, то их сигналы достигнут опорной плоскости измерений на входе ИУ в разное время. То же самое относится и к длинам кабелей, по которым в приемник поступают отраженные сигналы. Если они будут разными, сигналы придут в приемник не одновременно. В рефлектометрах 86100 для устранения эффектов асимметрии, связанных с длиной сигнальных трактов до входа ИУ, предусмотрена специальная процедура. На первом этапе этой процедуры сигналы ГСТС выравниваются друг относительно друга в опорной плоскости измерений (для обеспечения сбалансированного входного воздействия на ИУ), а на втором этапе устраняются расхождения во времени прибытия отраженных сигналов в приемник рефлектометра.

Важно понимать различия между измерениями в режиме дифференциального входного воздействия и простым пересчетом двух результатов измерений при однопроводном входном воздействии на каждое плечо в отдельности. При измерениях в однопроводном режиме, входное воздействие подается на одно из плеч и на измерительном порте фиксируется отраженный сигнал. При дифференциальном входном воздействии измерения проводятся по двум портам, на них одновременно подаются сигналы и фиксируются отклики. Разница заключается в том, что при подаче входного воздействия на одно из плеч дифференциальной линии, сигнал может навестись в соседнее плечо и отраженный сигнал будет в обоих плечах. Кроме того, на характеристический импеданс (волновое сопротивление) линии передачи будет влиять тип входного воздействия (дифференциальное или однопроводное) и связь плеч.

Ниже приведен пример модели дифференциальной линии и результатов измерений ее импеданса в однопроводном режиме. Импеданс каждого из плеч дифференциальной линии в однопроводном режиме у входа равен 50 Ом. На входе они физически разделены и имеют минимальную связь. Затем линии сходятся вместе и каждая из них становится уже (что должно привести к увеличению импеданса в однопроводном режиме). К выходу линии опять расходятся и становятся шире.



Рисунок 10. Модель дифференциальной линии.

Если каждое из плеч измерять по-отдельности в однопроводном режиме, на экране рефлектометра мы увидим, что рефлектограмма сначала проходит по уровню 50 Ом, затем будем наблюдать переход на секцию с импедансом 70 Ом, а в конце снова переход на секцию 50 Ом и в нагрузку 50 Ом. Результаты будут схожи для обоих плеч.

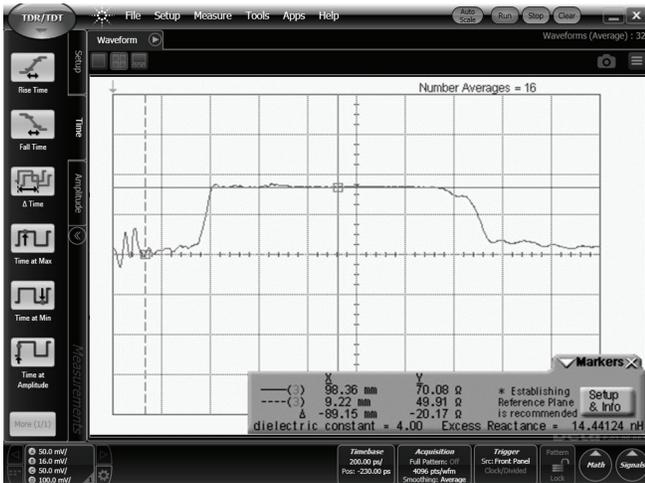


Рисунок 11. Рефлектограмма дифференциальной линии, измеренная в однопроводном режиме.

В дифференциальном режиме измерений рефлектометр обрабатывает результаты измерений сразу по двум портам при одновременном входном воздействии на оба плеча. Таким образом, сигнал в каждом плече будет обусловлен совокупным воздействием сразу двух ГТС. В результате мы увидим, что дифференциальный импеданс линии близок к значению 100 Ом, как и задумывалось при проектировании линии. При дифференциальном воздействии импеданс каждого из плеч относительно земли равен 50 Ом.

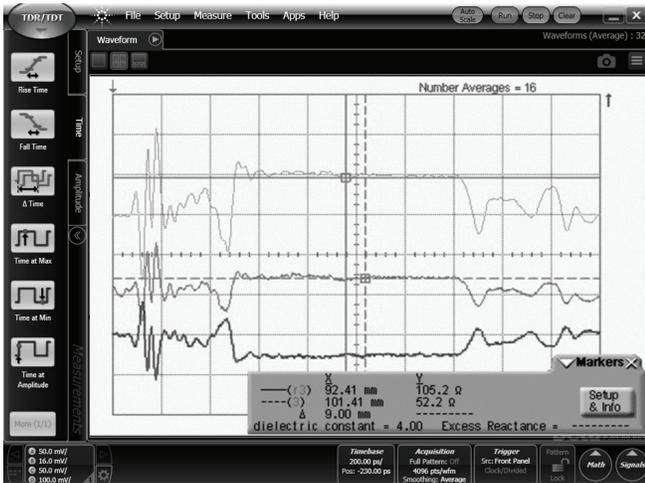


Рисунок 12. Результаты измерений, полученные в дифференциальном режиме входного воздействия. Зависимость дифференциального импеданса (верхний график) и импедансов каждого из плеч дифференциальной линии в отдельности (средний и нижний графики).

Завершающими шагами по снижению погрешностей измерений будут введение коррекции для учета влияния измерительных приспособлений и устранение любых остаточных искажений формы сигналов ГТС. Этого добиваются посредством выполнения процедуры калировки, описанной ранее. При измерениях параметров дифференциальных устройств процедура аналогична обычной калировке рефлектометра в однопроводном режиме, с одной лишь разницей – она проводится дважды (отдельно для каждого плеча). Калировка также позволяет в дальнейшем регулировать время нарастания фронта ступенчатого сигнала, делая его больше или меньше.

Выигрыш от использования дифференциальной калировки наглядно показан в приведенном ниже примере, где устраняется негативное влияние неидеальных измерительных приспособлений и кабелей на результаты измерений параметров ИУ. Первый шаг – устранить любую асимметрию в системе перед ИУ. Сначала анализируется сигнал в плоскости подключения ИУ путем создания в этой плоскости режима КЗ или ХХ (рисунок 13). На половину асимметрия компенсируется за счет введения положительного сдвига времени запуска формирования

сигнала «опаздывающего» ГТС. Оставшаяся часть устраняется посредством введения задержки по времени измерения запоздавшего сигнала в приемнике, что позволяет ему догнать сигнал, пришедший раньше. Еще раз заметим, что эти поправки вводятся не для устранения асимметрии ИУ, а для компенсации асимметрии измерительной системы, к которой будет подключено ИУ.

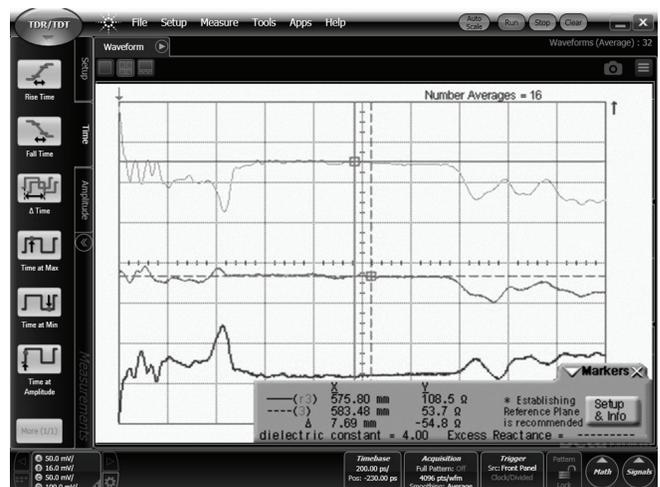
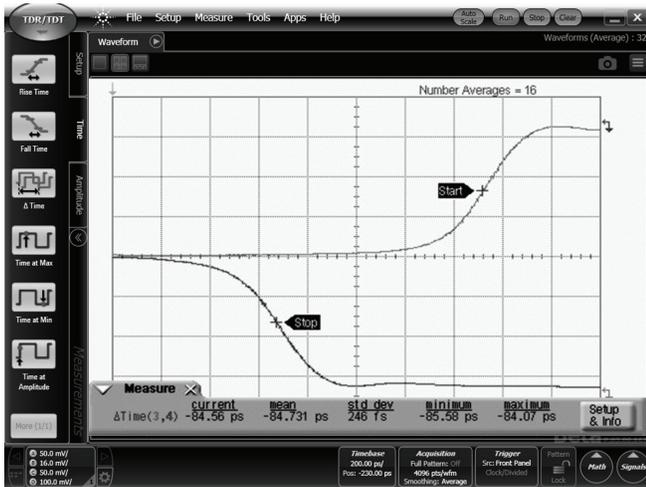


Рисунок 14. Результаты измерений импеданса дифференциальной линии и каждого ее плеча в отдельности при дифференциальном входном воздействии без компенсации влияния параметров оснастки.

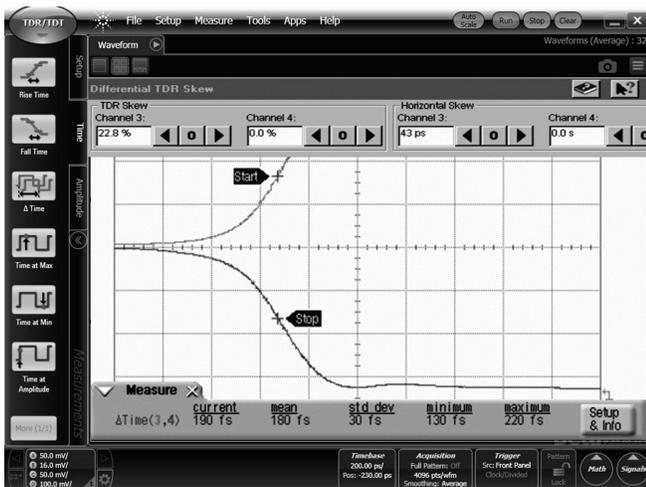


Рисунок 13. До и после коррекции асимметрии.

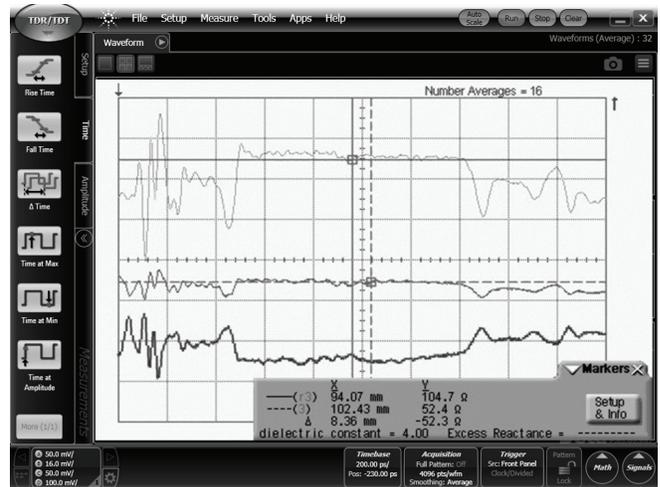


Рисунок 15. Результаты измерений импеданса дифференциальной линии и каждого ее плеча в отдельности при дифференциальном входном воздействии с компенсацией влияния параметров оснастки.

Даже при точной юстировке сигналов ГТС и приемников, измерительные приспособления, используемые для подключения к ИУ, могут исказить как входное воздействие, так и отклик ИУ. Для примера между рефлектометром и ИУ были намеренно введены дополнительные кабели и потери. Результат измерений без компенсации этих составляющих систематической погрешности показан на рисунке 14. Сравните результаты измерений дифференциального импеданса (верхний график) и импеданса каждого из плеч дифференциальной линии в отдельности (средний и нижний графики), показанные на рисунке 14, с аналогичными результатами без использования измерительных приспособлений, приведенными на рисунке 12. Вместо того, чтобы в дифференциальном режиме получить значение дифференциального импеданса линии 105 Ом и каждого из ее плеч в отдельности 52 Ом, мы наблюдаем завышенные показатели – 109 и 54 Ом, соответственно.

Повторяем измерения, оставив измерительную схему без изменений со всеми кабелями и потерями в элементах соединения, но теперь выполняем калибровку и вводим коррекцию этих составляющих систематической погрешности. Полученные результаты (рисунок 15) идеально согласуются с показанными на рисунке 12, как будто дополнительных измерительных приспособлений вовсе нет.

Калиброванная измерительная система способна обеспечить максимально достижимую точность при TDR-измерениях параметров дифференциальных устройств, даже в условиях присутствия некоторых механизмов возникновения погрешностей. Рассмотренные методы измерений и калибровки применимы и при измерениях в режиме синфазного входного воздействия, когда два ГСТС формируют сигналы одинаковой полярности. Для калибровки в этом случае используются те же образцовые меры (КЗ и СН). Калибровка позволяет добиться значительного улучшения результатов измерений, когда требуется подключить коаксиальный выход рефлектометра к не коаксиальному ИУ посредством кабелей и/или измерительных приспособлений (например, с помощью пробника), конечно если имеется возможность создать режимы КЗ и СН в опорной плоскости измерений.

## Получение S-параметров из традиционных результатов TDR-измерений

Для более глубокого понимания закономерностей поведения устройства могут быть важны не только результаты измерений во временной области, но и их анализ в частотной области. Например, распространенной измерительной задачей является определение коэффициента отражения устройства в заданном диапазоне частот, предположим от единиц килогерц до единиц гигагерц. Частотная характеристика устройства часто играет важную роль при анализе характера его поведения. В частотной области легко выявить резонансы и установить связь особенностей поведения устройства с его общими характеристиками. Результаты измерений в частотной области могут помочь в составлении расширенной модели поведения устройства. Десятилетиями для целей моделирования при разработке устройств, работающих в радиочастотном диапазоне, используются S-параметры (параметры рассеяния).

Традиционным измерительным прибором, используемым для оценки S-параметров устройств, является векторный анализатор цепей (ВАЦ), использующий для формирования гармонического входного воздействия генераторы качающейся частоты или синтезаторы частот. Для фиксации сигналов падающей и отраженной от ИУ волны в ВАЦ используются приемники, настроенные на частоту источника сигналов. Устройства могут быть как однопортовыми (только вход или выход), так и двухпортовыми (вход и выход). В случае двухпортовых устройств нас интересуют не только параметры отражения для каждого порта, но и параметры передачи. Таким образом, полная матрица S-параметров двухпортового устройства включает два параметра отражения и два параметра передачи.

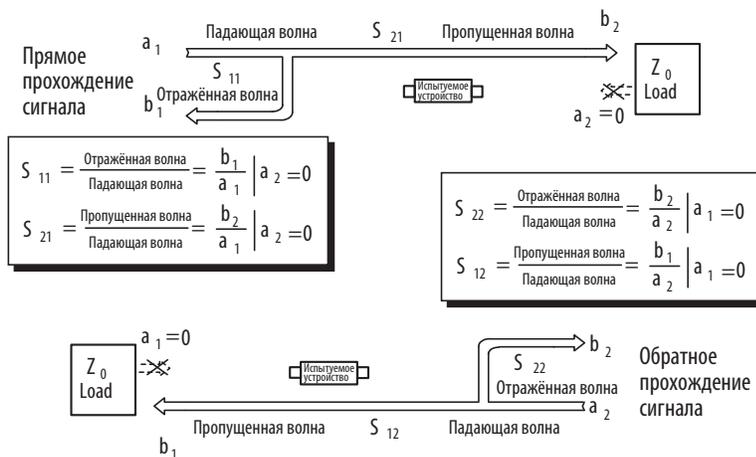


Рисунок 16. Полная сигнальная модель S-параметров двухпортового устройства.

## Измерения параметров дифференциальных устройств и линий

Если рассматривается дифференциальное устройство с одним входом и одним выходом, состоящие из положительного и отрицательного плеча, то речь идет о четырехпортовом устройстве и к приведенной выше модели следует добавить еще два порта. Однако, плечи дифференциальных устройств связаны и этот факт приводит к удвоению 8 S-параметров двух плеч устройства и их становится 16. Отметим, что пока рассматривается только измерения в режиме однопроводного входного воздействия. Это означает, что при измерениях входное воздействие подается только на один из четырех портов и только на одном из них фиксируется отклик. S-параметры обозначаются с использованием подстрочных индексов, как  $S_{\text{выход/вход}}$ . Например, запись  $S_{21}$  означает, что входное воздействие подается на порт 1, а отклик фиксируется на порте 2. В приведенном ниже примере дифференциального устройства один из дифференциальных портов состоит из пары однопроводных портов, обозначенных 1 и 3, второй порт составляют порты 2 и 4. Ниже приведены обозначения 16 S-параметров, которые возможно измерить при различных конфигурациях по принципу воздействие-отклик, а также некоторые их физические интерпретации.

Воздействие		Физические интерпретации параметров однопроводного режима:	
Отклик	$S_{11}$ $S_{12}$ $S_{13}$ $S_{14}$	$S_{11}$ : возвратные потери, однопроводный режим воздействия	
	$S_{21}$ $S_{22}$ $S_{23}$ $S_{24}$	$S_{21} = S_{12}$ : вносимые потери, однопроводный режим воздействия	
	$S_{31}$ $S_{32}$ $S_{33}$ $S_{34}$	$S_{31} = S_{13}$ : просачивание с ближнего порта смежного плеча	
	$S_{41}$ $S_{42}$ $S_{43}$ $S_{44}$	$S_{41} = S_{14}$ : просачивание с дальнего порта смежного плеча	



Рисунок 17. S-параметры двухпортового дифференциального устройства при однопроводном режиме воздействия.

Наконец, на дифференциальное (балансное) устройство может быть подано не только чисто дифференциальное входное воздействие, но и синфазное или смешанное. При этом рефлектометр также может фиксировать отклик в дифференциальном или синфазном режиме. Таким образом, полный набор S-параметров двухпортового дифференциального (балансного) устройства включает 32 S-параметра, для дифференциального, синфазного и смешанного режимов входного воздействия.

Важно понимать, какой практический смысл имеют результаты измерений при различных сочетаниях дифференциального и синфазного режимов. Обозначение дифференциальных S-параметров немного отличается от обозначения параметров однопроводного режима. Они все еще имеют формат S «выход-вход». Однако, дифференциальный порт 1 включает однопроводные порты положительного и отрицательного плеч, как и порт 2.



Рисунок 18. Модель дифференциальных S-параметров.

Таким образом, запись  $S_{DD11}$  обозначает, что на первом дифференциальном порту фиксируется дифференциальный отклик, в то время как на него же подается дифференциальное входное воздействие. Аналогично,  $S_{DD21}$  обозначает, что на дифференциальном порту 2 фиксируется дифференциальный отклик на дифференциальное входное воздействие, поданное на порт 1. Таким образом, матрица дифференциальных (балансных) S-параметров состоит из 16 элементов, разделенных на четыре квадранта (подгруппы), как показано на рисунке 19. В левом верхнем квадранте сгруппированы дифференциальные параметры передачи и отражения двухпортового дифференциального устройства (как правило дифференциальный вход и дифференциальный выход) в условиях дифференциального входного воздействия. Аналогично, нижний правый квадрант – параметры передачи и отражения двухпортового устройства в условиях синфазного входного воздействия.

Параметры смешанного режима (комбинации различных режимов воздействия и фиксации отклика, синфазного или дифференциального) заключают в себе важную информацию, позволяющую оценить возможность преобразования сигналов одного режима в другой, что характеризует степень восприимчивости устройства или линии к внешним помехам, или наоборот возможность создавать такие помехи. Например, нижний левый квадрант характеризует преобразование энергии дифференциальных входных сигналов в синфазные.  $S_{CD21}$  является коэффициентом преобразования энергии дифференциального входного сигнала, поданного на порт 1, в синфазный сигнал, фиксируемый на порте 2 (смотрите рисунок 20). Синфазные сигналы с большей вероятностью станут причиной излучений, чем дифференциальные, поэтому квадрант  $S_{CD}$  полезен при решении подобных проблем. Правый верхний квадрант ( $S_{DC}$ ) характеризует преобразование энергии синфазных сигналов в энергию дифференциальных. Дифференциальные системы по своему принципу приспособлены для снижения влияния внешних паразитных сигналов, поскольку такие сигналы наводятся одновременно в оба плеча с одной фазой, а значит не вносят вклада в разностный сигнал, потому что при вычитании дадут ноль. Но если паразитные синфазные сигналы преобразуются в дифференциальные, то они уже не будут отфильтровываться. Следовательно, параметры квадранта  $S_{DC}$  полезно измерять при решении проблем восприимчивости к паразитным сигналам. Например,  $S_{DC21}$  представляет собой коэффициент преобразования энергии синфазного сигнала, поданного на порт 1 и фиксируемого на выходе порта 2 в дифференциальном режиме.

Отклик		Stimulus			
		Дифференциальный сигнал		Синфазный сигнал	
		Порт 1	Порт 2	Порт 1	Порт 2
Дифференциальный сигнал	Порт 2	$S_{DD11}$	$S_{DD12}$	$S_{DC11}$	$S_{DC12}$
	Порт 1	$S_{DD21}$	$S_{DD22}$	$S_{DC21}$	$S_{DC22}$
Синфазный сигнал	Порт 2	$S_{CD11}$	$S_{CD12}$	$S_{CC11}$	$S_{CC12}$
	Порт 1	$S_{CD21}$	$S_{CD22}$	$S_{CC21}$	$S_{CC22}$

Рисунок 19. S-параметры смешанного режима.



Рисунок 20. S-параметры смешанного режима:  $S_{CD21}$ .

Несмотря на то, что для непосредственного измерения S-параметров в частотной области предназначен ВАЦ, рефлектометр 86100 может быть сконфигурирован для выдачи результатов измерений в виде частотных зависимостей S-параметров в дополнение к традиционным результатам TDR-измерений. В зависимости от конфигурации измерительного прибора, может быть получен полный набор из 32 дифференциальных S-параметров или его часть. На сегодняшний день стало возможно тщательно и всесторонне исследовать все характеристики устройства в частотной и временной областях с помощью одного измерительного прибора.

Рефлектометр 86100 с опцией 202 «Измерения S-параметров и характеристик временной области» позволяет выводить результаты измерений S-параметров непосредственно на дисплей.

### Список использованной литературы:

William H. Hayt Jr.: *Electromagnetic Engineering*, Глава 4.5 "The potential field of a system of charges", McGraw-Hill

Ramo, Whinery и Van Duzer: *Fields and Waves in Communication Electronics*, Глава 3.04 "Superposition", John Wiley and Sons

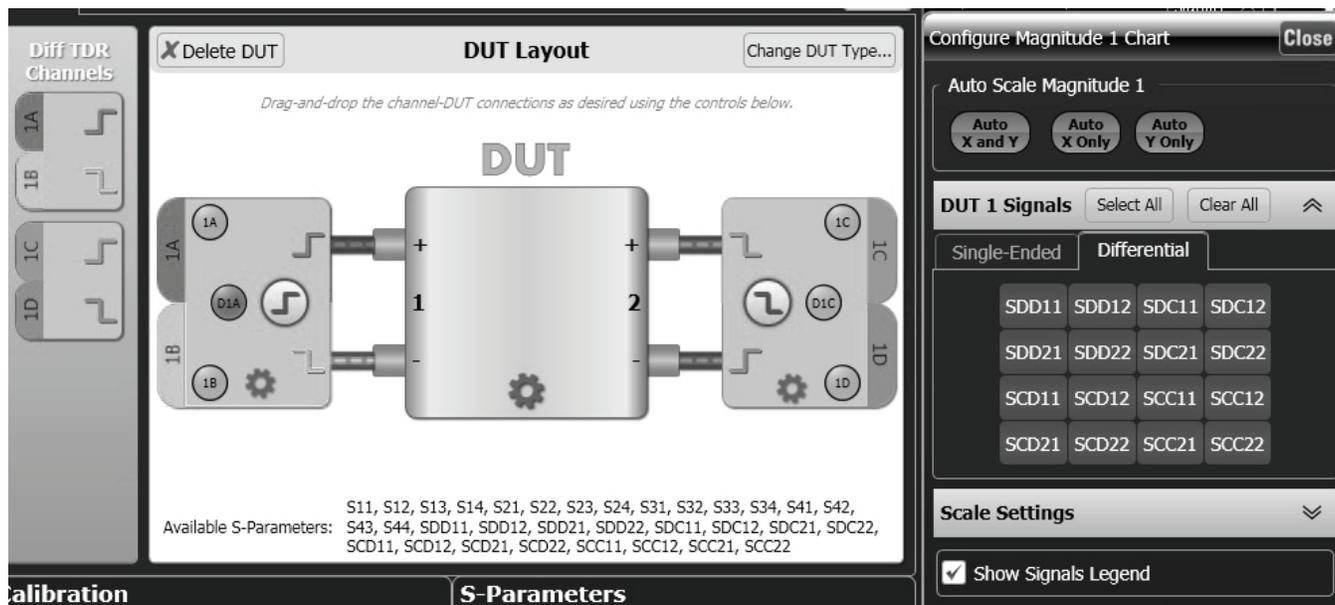


Рисунок 21. Окно настроек измерений рефлектометра 86100, на котором схематично показано дифференциальное ИУ и доступные для измерения S-параметры.



Рисунок 22. На экран рефлектометра 86100 можно вывести результаты измерений всех 32 S-параметров двухпортового дифференциального ИУ.

**myKeysight**

**myKeysight**

[www.keysight.com/find/mykeysight](http://www.keysight.com/find/mykeysight)

Персонализированная подборка только нужной вам информации.



[www.axiestandard.org](http://www.axiestandard.org)

Расширение AdvancedTCA® для контрольно-измерительного оборудования (AXIe) представляет собой открытый стандарт, расширяющий функциональность платформы AdvancedTCA для решения общих задач испытаний и тестирования полупроводниковых приборов. Компания Keysight является членом-учредителем консорциума AXIe. ATCA®, AdvancedTCA® и логотип ATCA – зарегистрированные в США товарные знаки компании PCI Industrial Computer Manufacturers Group.



[www.lxistandard.org](http://www.lxistandard.org)

LANeXtensionsforInstruments (расширения LAN для измерительных приборов) добавляет возможности локальной сети Ethernet и Web в измерительные системы. Компания Keysight является членом учредителем консорциума LXI.



[www.pxisa.org](http://www.pxisa.org)

PCleXtensionsforInstrumentation (PXI) (расширения PCI для измерительных систем) - формат модульных измерительных приборов для создания высокопроизводительных измерительных и автоматизированных систем на базе ПК для жёстких условий эксплуатации.

**Год Стандартной Заводской Гарантии**

Keysight обеспечивает высочайшее качество продукции и снижение общей стоимости владения и предлагает стандартную годовую гарантию на все свое оборудование.



**Планы технической поддержки Keysight**

<http://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.



[www.keysight.com/go/quality](http://www.keysight.com/go/quality)

Система менеджмента качества компании Keysight Technologies, Inc. сертифицирована DEKRA на соответствие ISO 9001:2015.



**Торговые партнёры Keysight**

[www.keysight.com/find/channelpartners](http://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/comms/lightwave](http://www.keysight.com/find/comms/lightwave)

Для получения дополнительных сведений о продукции, приложениях и услугах Keysight Technologies обратитесь в местное представительство компании Keysight. Полный перечень представительств приведен на сайте: [www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus)

**Северная и Южная Америка**

Канада	(877) 894 4414
Бразилия	55 11 3351 7010
Мексика	001 800 254 2440
США	(800) 829 4444

**Страны Азиатско-Тихоокеанского региона**

Австралия	1 800 629 485
Китай	800 810 0189
Гонконг	800 938 693
Индия	1 800 112 929
Япония	0120 (421) 345
Корея	080 769 0800
Малайзия	1 800 888 848
Сингапур	1 800 375 8100
Тайвань	0800 047 866
Другие страны Азиатско-Тихоокеанского региона	(65) 6375 8100

**Европа и Ближний Восток**

Австрия	0800 001122
Бельгия	0800 58580
Финляндия	0800 523252
Франция	0805 980333
Германия	0800 6270999
Ирландия	1800 832700
Израиль	1 809 343051
Италия	800 599100
Люксембург	+32 800 58580
Нидерланды	0800 0233200
Россия	8800 5009286
Испания	800 000154
Швеция	0200 882255
Швейцария	0800 805353
Великобритания	Доб. 1 (Германия), Доб. 2 (Франция), Доб. 3 (Италия) 0800 0260637

Контактная информация для стран, не вошедших в список, приведена на странице: [www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus) (BP-09-23-14)

