

Keysight Technologies

Обзор методов испытаний на соответствие электрических параметров устройств стандартам 10BASE-T, 100BASE-TX и 1000BASE-T

Рекомендации по применению

Число устройств, поставляемых со встроенной сетевой интерфейсной платой, неуклонно растет и будет продолжать расти, поскольку разрабатывается и продается все больше и больше цифровых устройств с выходом в сеть, используемых в развлекательных целях. На сегодняшний день сетевой интерфейс имеет большинство разрабатываемых цифровых устройств, от персональных компьютеров до камер видеонаблюдения. Времена, когда сетевой порт с пропускной способностью 10 Мбит/с можно было встретить только на сверхсовременных серверах и сетевом оборудовании, остались далеко в прошлом.

Обычно в основе технологии портов, известных как порты LAN или NIC, лежат стандарты 10BASE-T, 100BASE-TX и 1000BASE-T или их комбинации. Эти стандарты позволяют передавать данные по кабелю типа UTP (неэкранированная витая пара) с 8-контактным разъемом RJ-45 со скоростью 10, 100 или 1000 Мбит/с. В данной брошюре мы кратко опишем электрические сигналы, которые используются в этих технологиях, и расскажем о наиболее эффективных способах измерений и контроля их параметров. Эта информация будет полезной для инженеров, занятых испытаниями на соответствие сетевых интерфейсов своих устройствах стандартам 10BASE-T, 100BASE-TX и 1000BASE-T.

10BASE-T

Стандарт-долгожитель 10BASE-T применяется с 1990 года и пока не собирается уходить со сцены, хотя многие считают его устаревшим. Он обеспечивает скорость передачи данных 10 Мбит/с по двум парам проводов в кабелях категории 3 или 5, одна из которых обеспечивает передачу, а другая – прием. Две другие пары проводов кабеля при этом не используются.

100BASE-TX

100BASE-TX представляет собой наиболее широко используемую версию стандарта 100 Мбит/с Ethernet (известную как Fast Ethernet), используемого для передачи по кабелю UTP. Этот стандарт использует для передачи и приема все те же две пары проводов, что и 10BASE-T, но при этом требует использования кабеля категории 5 или выше.

1000BASE-T

1000BASE-T представляет собой наиболее распространенную версию стандарта 1000 Мбит/с Ethernet (известную как Gigabit Ethernet), используемого для передачи по кабелю UTP. Этот стандарт использует для передачи и приема все четыре пары проводов и при этом требует использования кабеля категории 5е или выше.

На рис. 1 и в табл. 1 показано назначение выводов 8-контактного разъема RJ-45 для кабеля с прямой разводкой.

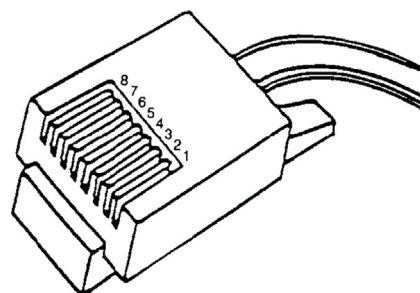


Рисунок 1. 8-контактный разъем RJ-45 также известен как разъем 8P8C.

Контакт	10BASE-T/ 100BASE-TX	1000BASE-T
1	TD+	BI_DA+
2	TD–	BI_DA–
3	RD+	BI_DB+
4	не используется	BI_DC+
5	не используется	BI_DC–
6	RD–	BI_DB–
7	не используется	BI_DD+
8	не используется	BI_DD–

Таблица 1. Назначение выводов 8-контактного разъема RJ-45 для стандартов 10BASE-T, 100BASE-TX и 1000BASE-T для кабелей с прямой разводкой. TD/RD означает передачу/прием данных. BI_D**X** означает дву-направленную пару **X**.

Захват и измерение параметров сигналов стандарта 10BASE-T с помощью пробников

Стандарт 10BASE-T использует для передачи данных дифференциальный сигнал, а наиболее простым методом измерений параметров таких сигналов является их захват посредством пробника с контактов TD+ и TD-, при подключенной резистивной нагрузке 100 Ом, как показано на рис. 2а. Кроме резистивной нагрузки 100 Ом, стандарт предусматривает использование еще двух дополнительных нагрузок для измерений. Эти две дополнительные нагрузки показаны

на рис. 3. Кроме прямого соединения цепи TD с нагрузкой, стандарт описывает применение имитатора витой пары (TPM). TPM представляет собой эквивалентную цепь, которая имитирует искажения, вносимые симплексным сегментом линии передачи, и состоит из четырех RLC-цепей (здесь не показаны). Измерения некоторых параметров 10BASE-T выполняются многократно как с использованием TPM, так и без него, на нагрузках 1 и 2, включая резистивную нагрузку 100 Ом. Таким образом, измерений получается довольно много.

Давайте рассмотрим измерения формы сигналов стандарта 10BASE-T. Обычно при испытаниях используются четыре различные формы сигналов. Если иное не оговорено особо, все рассматриваемые в данной брошюре сигналы измеряются по схеме, приведенной на рис. 2а, с резистивной нагрузкой 100 Ом.

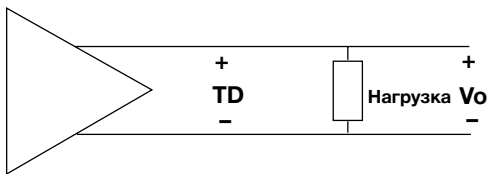


Рис. 2а. Цепь 10BASE-T TD подключена к нагрузке напрямую. Выходное напряжение Vo измеряется на нагрузке.



Рис. 2б. Цепь 10BASE-T TD подключена к нагрузке через модель витой пары (TPM).

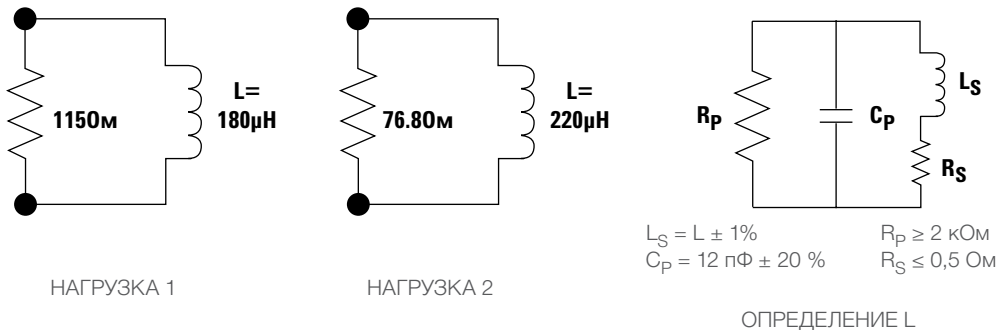


Рис. 3. Нагрузки 1 и 2, используемые для измерений параметров сигналов стандарта 10BASE-T.

Захват и измерение параметров сигналов стандарта 10BASE-T с помощью пробников (продолжение)

К первому типу сигналов относится сигнал LTP, или импульс проверки соединения, также известный как NLP, или нормальный импульс соединения (рис. 4). LTP представляет собой первый сигнал, передаваемый передатчиком стандарта 10BASE-T, который используется, чтобы показать присутствие активного передатчика. Если на противоположном конце линии присутствует другое активное устройство, оно отвечает своим сигналом LTP. Кроме того, LTP используется в пакетах для формирования слов данных во время обмена информацией о возможностях устройства в процессе установки соединения. Во всех случаях импульс LTP должен укладываться в определенный шаблон для всех комбинаций нагрузок как с имитатором витой пары, так и без него.

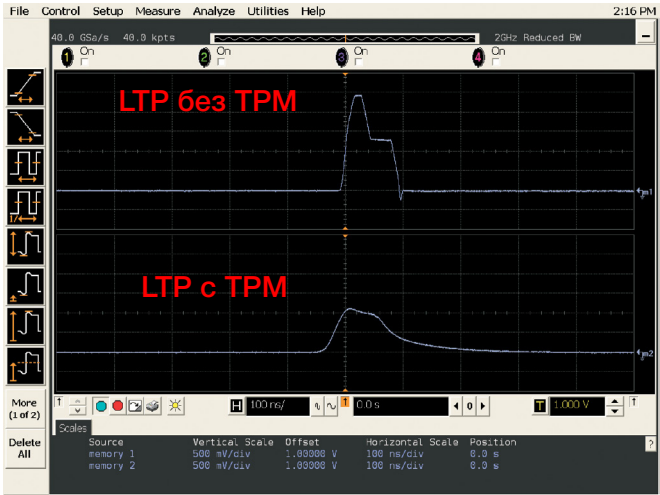


Рисунок 4. Импульс проверки соединения (LTP) с имитатором витой пары (TPM) и без него.



Рис.5. Сигнал LTP с TPM в шаблоне LTP.

Захват и измерение параметров сигналов стандарта 10BASE-T с помощью пробников (продолжение)

Следующий интересующий нас сигнал – это TP_IDL. Данные по стандарту 10BASE-T передаются пакетами, в которых применяется Манчестерское кодирование (логическая «1» кодируется переходом с низкого на верхний уровень), причем пакеты отделяются пустыми промежутками, известными также как межкадровые (межфреймовые) интервалы (промежутки). Сигнал TP_IDL указывает начало межфреймового интервала и, следовательно, располагается в конце каждого пакета данных. Как и в случае с сигналом LTP, сигнал TP_IDL должен укладываться в определенный шаблон для всех комбинаций нагрузки: как с имитатором витой пары, так и без него.

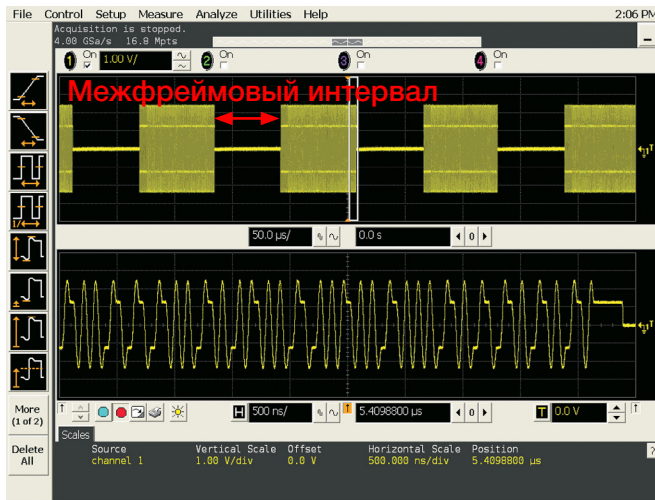


Рис.6. Случайная последовательность пакетов данных с Манчестерской кодировкой. В нижней части экрана показан увеличенный фрагмент сигнала, соответствующий белому прямоугольнику в верхней части экрана.

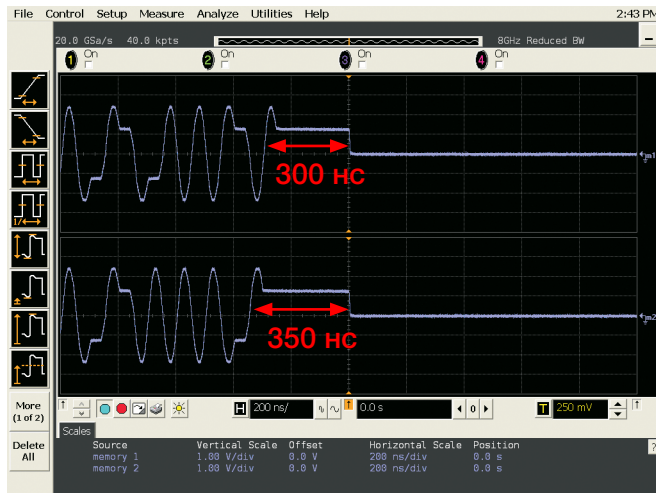


Рис.7. TP_IDL – положительный импульс длительностью 300 или 350 нс в зависимости от значения последнего бита, единица или ноль соответственно.



Рисунок 8. Сравнение сигнала TP_IDL с маской.

Захват и измерение параметров сигналов стандарта 10BASE-T с помощью пробников (продолжение)

Номинальная частота сигналов стандарта 10BASE-T равна 10 МГц. Сигнал в Манчестерской кодировке, состоящий только из единиц, соответствует гармоническому сигналу с частотой 10 МГц. Такой сигнал используют, чтобы проверить, все ли гармонические составляющие в тракте передатчика по уровню ниже несущей как минимум на 27 дБ. Подобные измерения выполняются достаточно просто, поскольку наиболее современные цифровые осциллографы имеют функцию быстрого преобразования Фурье (БПФ). Применение БПФ вместе с оконной функцией Хеннинга для повышения точности по частоте позволяет легко измерить уровни сигнала 10 МГц и всех его гармоник.

Кроме сравнения с шаблоном и контроля уровня гармоник, можно измерить пиковое дифференциальное выходное напряжение и синфазное напряжение. Эти измерения выполняются для сигналов случайных данных, как показано на рис. 6, и относительно просты.

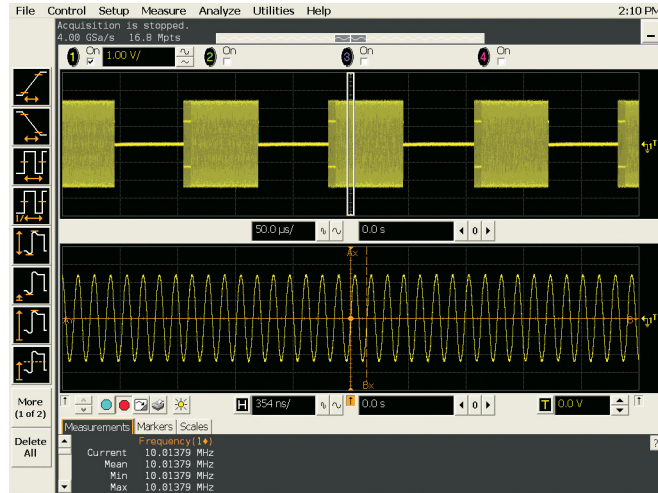


Рисунок 9. Сигнал в Манчестерской кодировке, состоящий только из единиц.

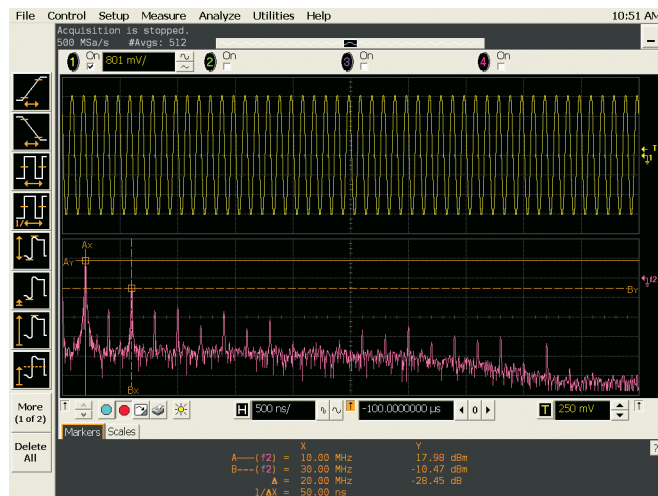


Рисунок 10. Экран осциллографа разделен на две части: верхняя часть соответствует сигналу в Манчестерской кодировке, состоящему только из единиц. Осциллограмма в нижней части экрана получена с помощью функции БПФ осциллографа для измерения гармоник сигнала в Манчестерской кодировке, состоящего только из единиц. В этом примере показан маркер, установленный на частоту несущей 10 МГц, а другой маркер установлен на третью гармонику (30 МГц). Уровень третьей гармоники, показанной здесь, составляет -28,45 дБ относительно уровня несущей.

Испытания на соответствие стандарту 100BASE-TX

В стандарте 100BASE-TX используется схема линейного кодирования, известная как MLT-3, в которой используются три логических уровня напряжения, а логическую единицу обозначает смена логического уровня. Линейное кодирование MLT-3 позволяет использовать меньшую полосу частот, чем потребовалась бы для другой схемы кодирования, такой как NRZ, при той же скорости передачи. Испытания на соответствие стандарту 100BASE-TX проводятся в условиях передачи пустой кодовой последовательности данных в формате кода MLT-3. Многие устройства при выборе скорости 100 Мбит/с автоматически переходят в режим передачи пустой кодовой последовательности, часть которой показана на рис. 11. Эта последовательность используется во всех испытаниях на соответствие стандарту 100BASE-TX.

Для быстрой проверки выходного сигнала передатчика стандарт 100BASE-TX позволяет использовать глазковую диаграмму с определенной стандартной маской. Обратите внимание, что использование маски глазковой диаграммы не заменяет тщательной проверки всех параметров на соответствие стандарту 100BASE-TX, но позволяет достаточно точно оценить качество передатчика.



Рисунок 11. Пустая кодовая последовательность в формате кода MLT-3, поступающая от передатчика стандарта 100BASE-TX.

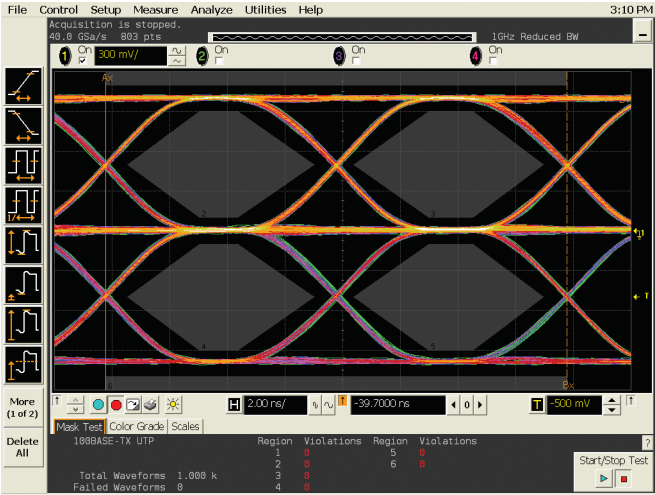


Рис. 12. Маска и глазковая диаграмма для сигнала стандарта 100BASE-TX. Осциллограф, используемый для создания глазковой диаграммы, синхронизирован по сигналу тактовой частоты, восстановленному из передаваемого сигнала.

Испытания на соответствие стандарту 1000BASE-TX

Стандарт 1000BASE-T для передачи данных предусматривает использование всех четырех пар проводов кабеля типа витая пара и пятиуровневую импульсную амплитудную модуляцию, получившую название PAM5. Из-за этого проведение испытаний, аналогичных используемым для стандартов 10BASE-T и 100BASE-TX, становится сложной задачей, для которой данный стандарт определяет четыре различных контрольных режима. Они называются контрольными режимами 1–4 и устанавливаются путем записи соответствующих значений в биты управляющего регистра 1000BASE-T (регистр 9.13:15). Испытания проводятся по всем четырем парам передатчика.

В контрольном режиме 1 передатчик передает все пять логических уровней сигнала кодировки PAM5 в виде последовательности символов «+2», «–2», «+1» и «–1», разделенных 127 символами «0». Затем дважды повторяется длинная строка, состоящая из 128 символов «+2» и «–2», после чего передается 1024 символа «0». Далее представляющие интерес точки результирующего сигнала помечаются буквами от A до M (I пропускается). Точки A, B, C и D обозначают символы «+2», «–2», «+1» и «–1», соответственно.

В контрольном режиме 1 выполняются три измерения. Сначала измеряется пиковое напряжение в точках A, B, C и D. При этом напряжения в точках A и B сравниваются, поскольку они не должны отличаться более чем на 1%. Эти измерения достаточно просты, нужно просто увеличить масштаб в интересующей точке и выполнить измерение.

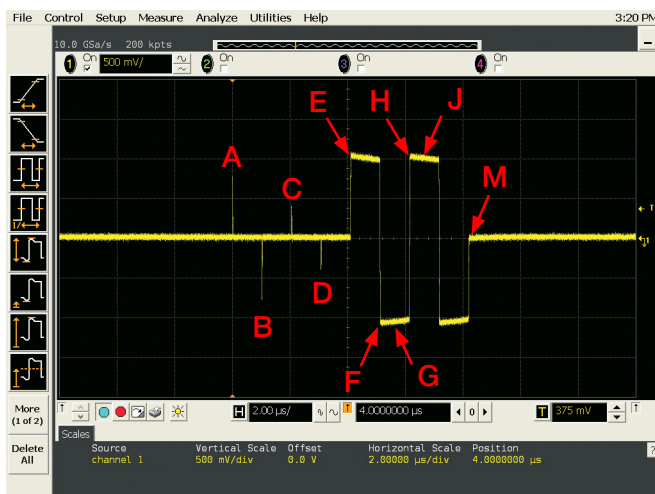


Рис. 13. Один период сигнала контрольного режима 1 с помеченными контрольными точками от A до M.

Испытания на соответствие стандарту 1000BASE-TX (продолжение)

Далее выполняются тесты по маскам. Точки А, В, С, D, F и Н должны соответствовать определенному шаблону после прохождения через фильтр верхних частот 2 МГц и после нормализации в соответствии с определенными правилами, описанными в подпункте 40.6.1.2.3 стандарта IEEE 802.3-2005. Эти действия можно выполнить с помощью цифровых осциллографов, как показано на рис. 14а, 14b и 14с ниже, на примере проверки по шаблону для точки А.

Помимо проверок по шаблону, проводятся контрольные измерения спада вершины в длинных строках символов «+2» и «-2». Спад напряжения измеряется от точки F (минимальная точка в начале строки символа «-2») до точки G (500 нс после точки F), а также от точки Н (максимальная точка сигнальной кривой, как показано на рис. 3) до точки J (500 нс после точки Н).

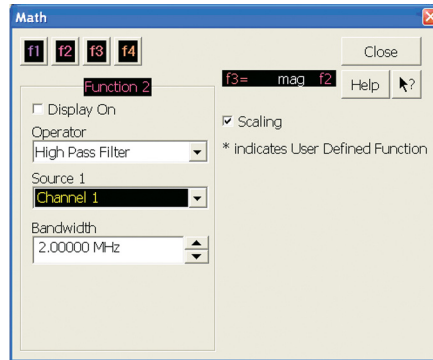


Рис. 14а. В этом примере цифровой осциллограф позволяет обрабатывать сигнал с помощью различных функций. В данном окне показана процедура применения фильтра верхних частот с частотой среза 2 МГц к источнику сигнала в канале 1 (Функция 2).

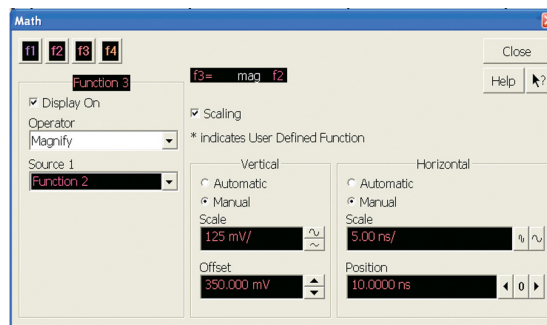


Рис. 14b. Функция 3 затем используется для усиления отфильтрованного с использованием функции 2 сигнала. Форма сигнала в точке А нормализуется путем деления на значение пикового напряжения в точке А.

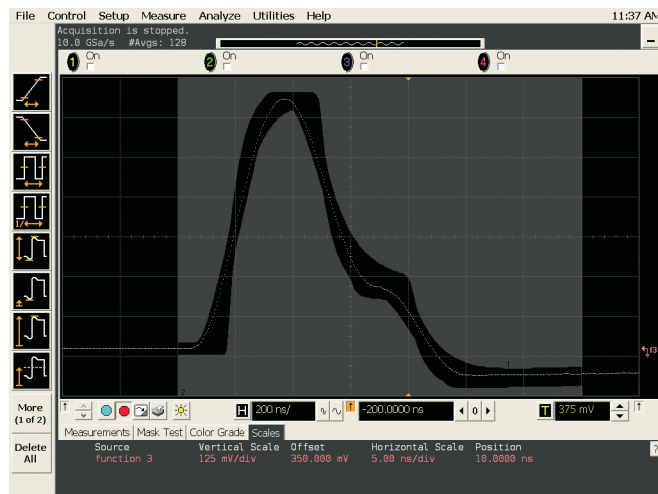


Рис. 14с. Отфильтрованная и нормализованная сигнальная кривая в точке А затем выравнивается таким образом, чтобы как можно точнее соответствовать шаблону.

Испытания на соответствие стандарту 1000BASE-TX (продолжение)

Теперь давайте рассмотрим контрольные режимы 2 и 3. Контрольные сигналы представляют собой чередующиеся символы «+2» и «-2», синхронизированные с тактовой частотой 125 МГц, которая называется TX_TCLK. Контрольные режимы 2 и 3 отличаются использованием источника синхросигнала. Контрольный режим 2 называется режимом ведущего и использует тактовый сигнал самого передатчика, тогда как контрольный режим 3 называется режимом ведомого и использует восстановленный из данных, передаваемых по каналу другим устройством в режиме ведущего. Для измерений джиттера устройства 1000BASE-T нужно получить доступ к его сигналу TX_TCLK для захвата с помощью пробника. Информацию о том, на какие контакты выводится сигнал TX_TCLK, можно найти в технической документации на устройства стандарта 1000BASE-T. Форма сигнала в контрольных режимах 2 и 3 в сущности одинакова; на рис. 15 показан образец формы такого сигнала и сигнал TX_TCLK. Измерения джиттера подробно описываться не будут, поскольку это выходит за рамки данной брошюры.

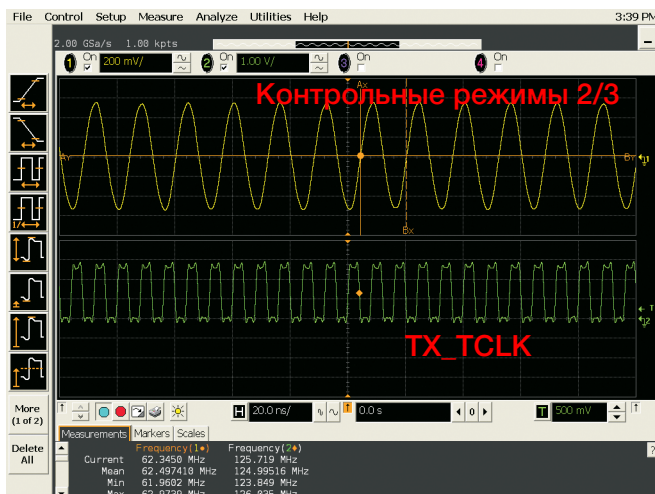


Рис. 15. Форма сигнала контрольных режимов 2/3 вместе с сигналом TX_TCLK (125 МГц).

Испытания на соответствие стандарту 1000BASE-TX (продолжение)

Наконец, рассмотрим контрольный режим 4. В контрольном режиме 4 устройство формирует псевдо-случайную битовую последовательность, состоящую из 2047 символов в кодировке PAM5, которая далее пропускается через фильтр с частичным откликом. На выходе фильтра получается 17-уровневый сигнал, который показан на рис. 16. Форма сигнала контрольного режима 4 дает представление о форме реального сигнала, передаваемого устройством стандарта 1000BASE-T. Выходной сигнал контрольного режима 4 используется в качестве сигнала источника для измерений пиковых искажений передатчика.



Рис. 16. Форма сигнала контрольного режима 4.

Измерения искажений с помощью осциллографа не являются прямыми и требуют дополнительной пост-обработки для расчета искажений. Для справки в стандарте приведен образец кода MATLAB для расчета искажений. С помощью этого кода считывается каждый из 2047 символов с произвольной фазой, с тактовой частотой на основе сигнала TX_TCLK. Затем код проверяет каждую выборку на предмет искажений и выдает максимальное значение в качестве пикового. Как правило, эта процедура связана с обработкой большого объема записанных данных, охватывающих несколько периодов сигнала контрольного режима 4. Затем полученная запись формы сигнала передается на персональный компьютер и обрабатывается согласно алгоритму, приведенному в коде MATLAB.

Как и в случае 10BASE-T, где стандартом предписывается выполнение некоторых проверок с моделью витой пары, стандарт 1000BASE-T также требует выполнения некоторых измерений в контрольных режимах 1 и 4 в присутствии сигнала помехи. В качестве источника помехи определен генератор синусоидального сигнала, имитирующий потенциальное нежелательное воздействие другого передатчика стандарта 1000BASE-T. Однако подробное описание проверки с использованием сигнала-помехи выходит за рамки данной брошюры.

Измерения возвратных потерь

Возвратные потери оцениваются путем измерения полной отраженной энергии, возвращаемой от приемного устройства на передающее устройство. Возвратные потери нормируются в стандартах 10BASE-T, 100BASE-TX и 1000BASE-T. Они особенно важны для устройств стандарта 1000BASE-T, так как эти устройства используют метод двунаправленной передачи сигналов. Это означает, что контакты, используемые для передачи данных, используются также для их приема. Если принимающее устройство имеет неудовлетворительную величину возвратных потерь, то данные передающей стороны будут отражаться назад, приводя к помехам для передающего устройства, так как оно также работает как приемник, принимая данные от передатчика на другом конце. Таким образом крайне важно проводить измерения величины возвратных потерь, чтобы обеспечить функциональную совместимость с другими устройствами.

Измерения величины возвратных потерь выполняются с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ). Для облегчения измерений возвратных потерь можно использовать оснастку N5395C, специально разработанную для испытаний на соответствие стандартам Ethernet. Так как от Ethernet-устройства поступают дифференциальные сигналы, согласующий трансформатор в этих оснастках выполняет преобразование дифференциального сопротивления в полное сопротивление несимметричного входа ВАЦ. Кроме того, оснастка N5395C обеспечивают возможность создания режимов короткого замыкания, холостого хода и согласованной нагрузки с соединителями RJ-45 для калибровки векторного анализатора цепей по величине возвратных потерь.

Возвратные потери можно измерить с помощью ВАЦ в режиме однопортовых измерений прямого отражения или S11 в логарифмическом масштабе. Так как эти измерения выполняются с помощью согласующего трансформатора на 50 Ом, их результат должен быть математически приведен к величине опорного импеданса дифференциальной линии 100 ± 15 Ом. Таким образом возвратные потери рассчитываются для значений опорного импеданса 85 Ом, 100 Ом и 115 Ом (для 10BASE-T используется дополнительное значение 111 Ом).

Для выполнения преобразования используются следующие уравнения: возвратные потери в дБ,

$$RL_{дБ} = 20 \log_{10} |\Gamma_0|,$$

где Γ_0 представляет собой массив значений комплексного коэффициента отражения (в зависимости от частоты), полученный по результатам измерений с помощью ВАЦ, которые можно пересчитать в соответствующие значения импеданса:

$$\Gamma_0 = \frac{Z_{ВХ} - Z_0}{Z_{ВХ} + Z_0},$$

где $Z_{ВХ}$ - массив комплексных значений входного импеданса исследуемого устройства (в зависимости от частоты), а Z_0 - величина опорного импеданса, относительно которой выполнялись измерения (вещественное число).

Так как измерение было выполнено на ВАЦ, опорный импеданс измерительных портов которого 50 Ом, но при этом было выполнено преобразование 2:1 с помощью согласующего трансформатора, $Z_0 = 2 \cdot 50 = 100$.

Решение для $Z_{ВХ}$ будет следующим:

$$Z_{ВХ} = Z_0 \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}$$

Зная $Z_{ВХ}$, можно выполнить расчет коэффициентов отражения для различных значений опорного импеданса.

$$\Gamma_{85 \text{ Ом}} = \frac{Z_{ВХ} - 85}{Z_{ВХ} + 85}$$

$$\Gamma_{100 \text{ Ом}} = \frac{Z_{ВХ} - 100}{Z_{ВХ} + 100}$$

$$\Gamma_{115 \text{ Ом}} = \frac{Z_{ВХ} - 115}{Z_{ВХ} + 115}$$

Итоговое значение возвратных потерь в дБ может быть рассчитано следующим образом:

$$RL_{85 \text{ Ом}} = 20 \log_{10} |\Gamma_{85 \text{ Ом}}|$$

$$RL_{100 \text{ Ом}} = 20 \log_{10} |\Gamma_{100 \text{ Ом}}|$$

$$RL_{115 \text{ Ом}} = 20 \log_{10} |\Gamma_{115 \text{ Ом}}|$$

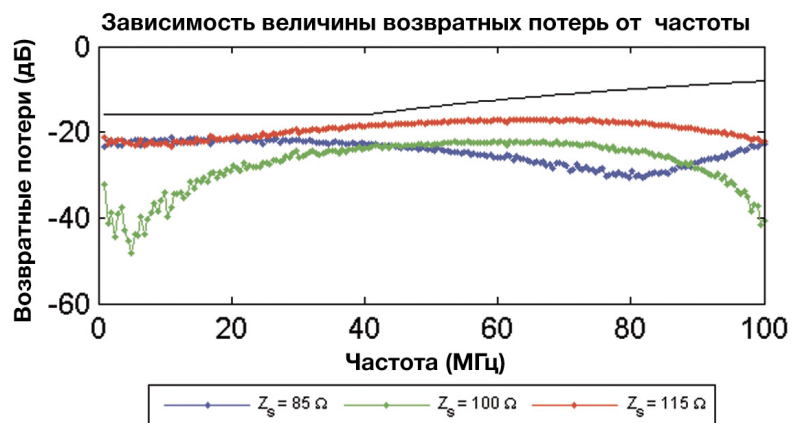


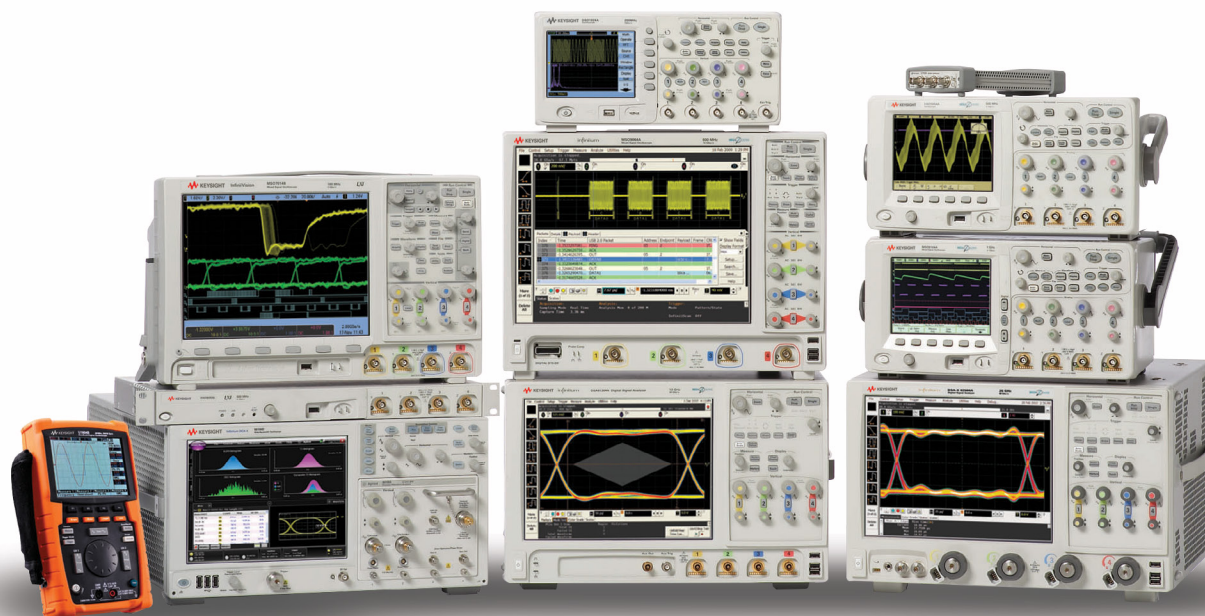
Рис. 17. График зависимости величины возвратных потерь устройства стандарта 1000BASE-T от частоты

Заключение

В брошюре приведен обзор методов испытаний на соответствие электрических параметров широко распространенных устройств стандартам 10BASE-T, 100BASE-TX и 1000BASE-T. По мере роста скорости передачи от 10 до 1000 Мбит/с возрастает и сложность сигналов, используемых для передачи данных в сети Ethernet. Эта тенденция сохранится и в будущем, поскольку конструкторы вынуждены применять все более сложные схемы модуляции для передачи большего объема данных по кабелю типа неэкранированная витая пара с ограниченной шириной полосы пропускания.

Качество и целостность сигнала средств измерений является залогом того, что вы получите достоверное представление об измеряемых параметрах сигналов. Большинство описанных здесь измерений можно выполнить вручную на современном цифровом осциллографе в режиме реального времени. Сигналы, показанные на иллюстрациях, были получены с помощью стандартных серийно выпускаемых сетевых карт и захвачены осциллографом Keysight серии 80000 с помощью активного дифференциального пробника. Для подключения по схемам, показанным на рис. 2 и 3,

использовалась оснастка N5395C, специально предназначенная для работы с сигналами Ethernet. Кроме того, компания Keysight предлагает специальную прикладную программу для автоматизации измерений, которую можно использовать с оснасткой N5395C.



Осциллографы Keysight Technologies

Различное конструктивное исполнение

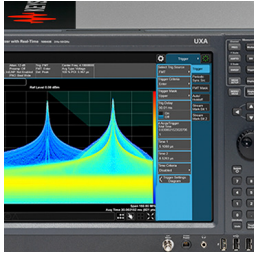
| Верхняя граница полосы пропускания от 20 МГц до >90 ГГц |

Лучшие в отрасли характеристики | Широкие возможности программного обеспечения

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 HewlettPackard и Agilent к Keysight.



Для получения дополнительных сведений о продукции, приложениях и услугах Keysight Technologies обратитесь в местное представительство компании Keysight. Полный перечень представительства приведен на сайте:

www.keysight.com/find/contactus

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

е-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

е-mail: tmo_russia@keysight.com

(BP-9-7-17)

DEKRA Certified
ISO 9001 Quality Management System

www.keysight.com/go/quality

Система управления качеством Keysight Technologies, Inc. сертифицирована DEKRA по ISO 9001:2015

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

Индивидуальная подборка наиболее важной для вас информации.

www.keysight.com/find/emt_product_registration

Зарегистрировав свои приборы, вы получите доступ к информации о состоянии гарантии и уведомления 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.