

Быстрое внедрение технологий PAM-4 в различных приложениях

Фанги Рао, Хейди Барнс, Keysight Technologies, Inc.

В статье речь идёт о PAM-4 – это технология кодирования, используемая в высокоскоростных последовательных каналах на объединительных платах, передающих данные со скоростью более 56 Гбит/с на канал. Её способность обеспечивать повышенную скорость передачи данных при том же качестве канала даёт существенную экономию, которая выражается в стоимости приобретённого оборудования.

Приёмники и передатчики, использующие новые технологии, уже продемонстрировали жизнеспособность сквозных каналов PAM-4. В результате в настоящее время вплотную рассматривается возможность применения этой технологии в новом поколении стандартов OIF и IEEE. Но чтобы в полной мере воспользоваться преимуществами кодирования PAM-4, нужно создать и проверить новые измерительные и моделирующие системы для этой технологии.

Что такое PAM-4

Любая система, построенная на технологии PAM-4, включает канал связи между передатчиком (Tx) и приёмником (Rx). Компоненты последовательного канала нужно проверять на возможность их применения с таким многоуровневым кодированием. Стандарты IEEE и OIF предлагают формулы частотной зависимости потерь и перекрёстных помех для входных/выходных соединителей и кабелей, но не дают прямой корреляции с реальной статистикой открытия глазковой диаграммы. Эту информацию можно получить либо путём измерения сигналов сквозного канала, либо с помощью моделирования канала.

В ходе измерений сквозного канала генерация сигналов PAM-4 выполняется либо специализированным устройством, собранным из дискретных компонентов, либо высококачественным

генератором сигналов произвольной формы. Схема измерения содержит серийно выпускаемый генератор сигналов PAM-4, физический высокоскоростной канал и цифровой осциллограф, используемый для захвата данных. Приёмник цифрового стробоскопического осциллографа содержит аппаратную схему восстановления тактовой частоты из данных (CDR), а также использует несколько методов программной коррекции (CTLE, DFE, FFE) для открытия глазка при выполнении измерений в зашумлённых каналах. Кроме того, измерения, выполненные с помощью осциллографа, включают методы последующей обработки, используемые для выполнения базового анализа сигналов. Моделирование сигналов PAM-4 выполняется по методу IBIS-AMI с помощью генератора сигналов IBIS-AMI, модели канала с S-параметрами и программного обеспечения удалённого доступа для восстановления данных приёмника.

Затем этот базовый сквозной канал PAM-4 используется для проверки корреляции между моделью и измерением. Такие базовые измерения, как высота глазка, его ширина и коэффициент битовых ошибок (BER), дают хорошую отправную точку для корреляции реальных параметров с результатами моделирования, хотя анализ отношения сигнала к шуму (С/Ш) зачастую позволяет быстрее оценить качество сигнала.

ФИЗИЧЕСКИЙ КАНАЛ

Чтобы продемонстрировать процесс сопоставления результатов моделирования и измерения, который позволяет оценить пригодность компонента для применения в последовательном канале PAM-4, мы использовали кабель с разъёмами QSFP28. Разъём для печатной платы QSFP28 представляет собой счетверённый компактный соединитель с полосой пропускания 28 Гбит/с на канал. Рассматриваемый физический канал использует непосредственно подключённый медный кабель. Этот кабель совершенно пассивен, поскольку не выполняет никакой обработки, усиления или коррекции сигнала. Он просто передаёт данные. Применение такого кабеля определяется свойствами канала в целом. Промышленные стандарты описывают такой сквозной канал и определяют допустимые потери в кабеле, разъёме печатной платы и в переходных платах модуля (MCB). Чем толще проводники, тем меньше потери на высоких частотах, и тем длиннее могут быть кабели.

Сквозной канал или тестируемое устройство (TU), используемое для проверки корреляции между моделированием и измерением для многоуровневого кодирования PAM-4, показан на рисунке 1. Генератор сигналов передаёт по каналу скорректированный сигнал, а осциллограф захватывает данные на другом конце и может применять дополнительную коррекцию для получения диаграмм с открытым глазком. Используемый четырёхканальный кабель с одинаковыми парами имеет длину 3 м и сечение проводников 0,05 мм² (30 AWG).

На переходных платах все высокоскоростные соединения 28 Гбит/с доступны через разъёмы 2,92 мм. На рисунке 2 показана нумерация контактов разъёма QSFP+ для двух используемых в измерении дифференциальных пар приёма-передачи, что позволяет анализировать перекрёстные помехи на дальнем конце. На рисунке 3 показана измеренная кривая вносимых потерь для переходной платы, использующей простое проходное соедине-

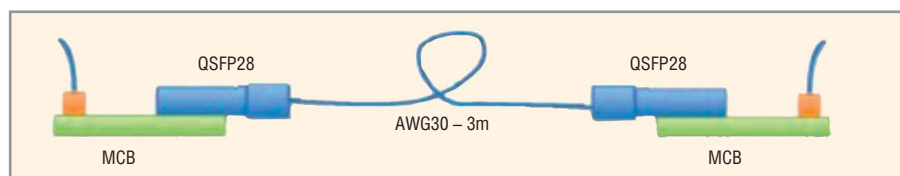


Рис. 1. Сквозной канал с разъёмами QSFP28 и переходные платы (MCB)

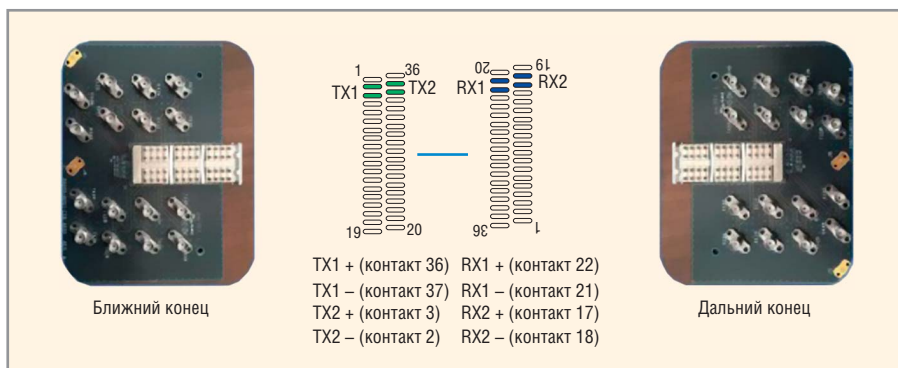


Рис. 2. Назначение контактов в схеме измерения

ние, длина которого вдвое превышает длину сигнального тракта QSFP28. Данные демонстрируют отсутствие резонансов в диапазоне до 21 ГГц (до полутора частот Котельникова для тактовой частоты 14 ГГц), что подтверждает соответствие свойств материала печатной платы и разъёмов 2,92 мм требованиям данного приложения.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕСТИРУЕМОГО УСТРОЙСТВА

Для измерения параметров высокоскоростной передачи пассивных кабелей можно использовать различные приборы, такие как векторный анализатор цепей (VNA), измеритель отражённого/прямого сигнала (рефлектометр) во временной области (TDR/TDT) или тестер коэффициента битовых ошибок (BERT). Все типы приборов и используемые ими методы измерений имеют свои достоинства и недостатки.

В данном приложении кабель имеет слишком большую длину для скорости передачи данных 28 Гбит/с. Поэтому при измерении, скорее всего, будут зарегистрированы большие потери. Эти потери можно измерить только прибором с достаточно широким динамическим диапазоном, таким как векторный анализатор цепей. Для измерения распределённых параметров иссле-

дуемого канала был выбран анализатор с полосой пропускания 67 ГГц. График дифференциальных потерь для двух пар (см. рис. 2) длиной 3 м и сечением 0,05 мм² (30 AWG) показан на рисунке 4.

Данные S-параметров канала сохранялись в формате Touchstone 1.0, который поддерживается всеми векторными анализаторами цепей высшего класса и легко импортируется в средства моделирования каналов. Файл в формате Touchstone представляет собой обычный текстовый файл и предназначен для документирования параметров N-портовых линейных устройств, таких как пассивные кабели. Экспортированный файл представляет собой файл в формате s8p, содержащий данные о перекрёстных помехах на дальнем конце. Однако в начальных тестах учитывался лишь один проходной канал с отключёнными источниками помех и оконечной нагрузкой 50 Ом. В результате файл был преобразован в формат s4p для моделирования канала.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ PAM-4

Все модели AMI, используемые для моделирования канала PAM-4, создавались так, чтобы отражать поведение передатчика (Tx) и приёмника (Rx). Каждая модель содержит анало-

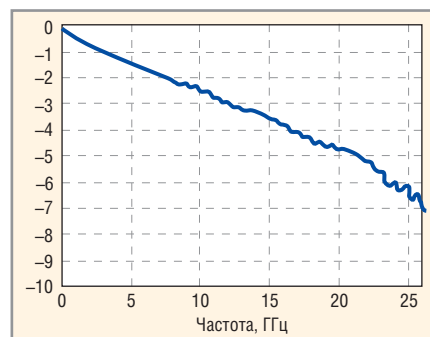


Рис. 3. Кривая вносимых потерь проходной линии на MCB (удвоенная длина трассы до разъёма)

говую часть и алгоритмическую часть. В модели Tx аналоговая часть охватывает выходной импеданс, а алгоритмическая часть – коррекцию Tx. В модели Rx аналоговая часть охватывает входную нагрузку, а алгоритмическая часть – коррекцию Rx и CDR. В данном приложении корректор Tx представляет собой трёхзвенную схему FFE, тогда как модель Rx реализует CTLE, DFE и CDR, чтобы представить обработку данных, выполняемую осциллографом.

Предполагается, что аналоговая модель Tx, физический канал и аналоговая модель Rx линейны, не зависят от времени и могут быть описаны комбинированной импульсной характеристикой аналогового канала, обозначаемой как hAC. В процессе моделирования на алгоритмическую модель Tx подавался четырёхуровневый прямоугольный сигнал, представляющий собой сигнал PAM-4. Для получения входного сигнала алгоритмической модели Rx выполнялась свёртка выходного сигнала Tx с характеристикой hAC. Модель Rx возвращает скорректированный сигнал и выходной сигнал CDR, который используется для построения глазка PAM-4 и расчёта коэффициента символьных ошибок (SER). Описанный процесс моделирования показан на рисунке 5.

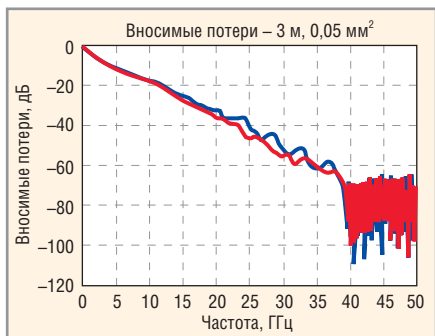


Рис. 4. Дифференциальные вносимые потери (3-метровый кабель с проводниками сечением 0,05 мм² (30 AWG))

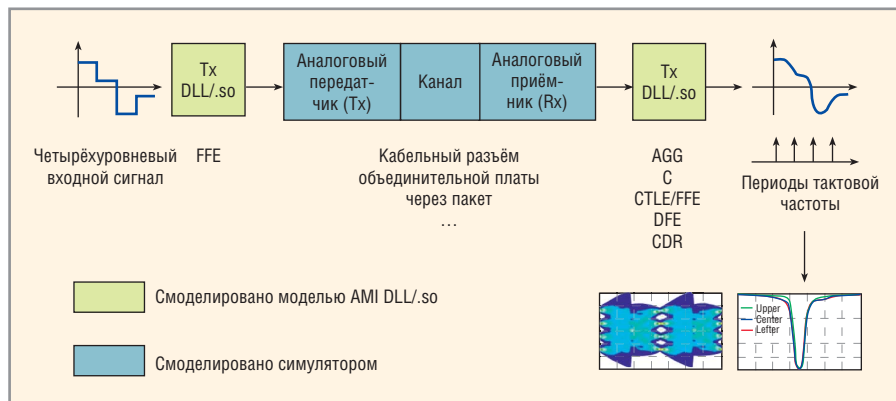


Рис. 5. Схема моделирования канала PAM-4 IBIS-AMI

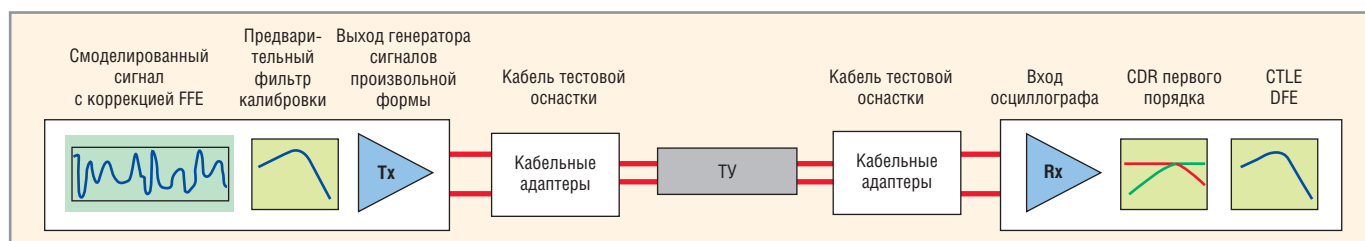


Рис. 6. Структурная схема измерения

Чтобы проанализировать параметры канала PAM-4 при разных уровнях сигнала, для каждого из трёх глазков рассчитывался SER. Для верхнего, среднего и нижнего глазка SER измерялся между символами 3 и 2, 2 и 1, 1 и 0 соответственно. Для каждого глазка генерировался один набор U-образных кривых и контуров SER.

ИЗМЕРЕНИЕ СИГНАЛОВ PAM-4

Теперь, когда мы рассмотрели схему измерений, нужно описать измерение параметров компонента, предназначенного для применения в системе с кодированием PAM-4. Целью является проверка измерительной схемы, которую можно было бы сопоставлять с моделью. На первый взгляд это может показаться простым делом, но слишком часто отсутствие калибровки и неправильный выбор эталонных плоскостей делает эту задачу очень сложной при скоростях передачи в несколько гигабит. Решение заключается в применении моделирования и измерений для выполнения перекрёстной проверки, которая позволит убедиться в достоверности результатов измерения и моделирования.

Процесс измерения показан на рисунке 6. В первую очередь надо учесть подключение к тестируемому устройству (ТУ), в качестве которого в нашем случае используется кабель QSFP28 с переходными платами. Канал PAM-4 будет обладать значительными потерями на больших скоростях, не говоря уже о меньшем значении C/Ш, которое вытекает из применения многоуровневых сигналов при том же размахе напряжения. Кроме того, нужно откалибровать потери в коаксиальном кабеле, подключённом к ТУ. Для калибровки потерь в соединительных кабелях используются методы калибровки приборов. Это позволяет исключить этапы добавления/исключения при моделировании и минимизирует число отличий результатов моделирования и измерения. Существуют надёжные математические методы «исключения» влияния тестовой оснастки, но на практике оказывают влия-

ние теория квантования, междоменные преобразования и проблемы допусков, которые могут вносить свои погрешности при сравнении результатов моделирования и измерения.

Следующая проблема заключается в проверке соответствия используемого в моделировании сигнала Tx сигналу, используемому в измерении. И снова решающее значение здесь имеет простота. В идеале было бы неплохо использовать в симуляторе модель передатчика, однако для PAM-4 эта задача нетривиальна. PAM-4 представляет собой новую технологию, использующую закрытые конструкторские решения, для которых отсутствуют стандартные методы генерации. Вследствие этого выбор моделей выпускаемых изделий очень мал. Если используется модель PAM-4 собственной разработки, то нет никаких гарантий, что канал будет вести себя одинаково для моделей разных производителей. Кроме того, сигнал передатчика PAM-4 должен включать сложную коррекцию, например, FFE (коррекция с прямой связью), для компенсации больших потерь на частоте Котельникова сигнала PAM-4 и открытия глазка в приёмнике. Открытие глазка в приёмнике позволяет CDR синхронизироваться с сигналом для выполнения измерений.

Чтобы обеспечить согласованность и гибкость оценки корреляции модели с результатами измерений для исследуемого приложения, генерируемый в симуляторе выходной сигнал Tx сохраняется в файле, загружается в генератор сигналов произвольной формы и передаётся в канал для измерения. Благодаря применению генератора сигналов произвольной формы, этот подход не только гарантирует применение одного и того же входного сигнала в измерении и моделировании, но и позволяет определить простую модель IBIS AMI PAM-4 Tx за счёт обработки трёхзвенной схемой FFE положительных и отрицательных перепадов битовой последовательности. Реальные перепады модели могут быть идеальными, поскольку это не реаль-

ное устройство. Настройку длительности перепада можно выполнять с помощью подключённой к выходу модели Tx AMI сосредоточенной ёмкости.

Симулятор использует эту простую модель PAM-4 Tx, чтобы настроить положительный перепад и схему FFE для измерения кабеля QSFP28. При настройке положительного перепада надо учитывать типовые значения для заданной скорости передачи и возможности аппаратной части генератора сигналов произвольной формы. И снова ключевым фактором здесь является простота. Если начать с перепадов с медленным нарастанием, хорошо укладывающихся в пределы регулирования генератора, то это уменьшит отражения/звоны, которые не захватываются используемой в симуляторе простой моделью Tx. Хотелось бы, конечно, чтобы генератор точно воспроизводил моделируемый сигнал и не выходил при этом за пределы регулирования. Чтобы учесть влияние соединительных кабелей тестовой оснастки и обеспечить нужный сигнал на входе приёмника или, в данном случае, осциллографа, используются функции калибровки генератора сигналов произвольной формы. Небольшие отклонения длительности положительных и отрицательных перепадов, уровня амплитуды, шума и случайного джиттера в симуляторе можно скорректировать за счёт применения простой тактовой последовательности.

Затем нужно решить, следует ли использовать осциллограф реального времени или стробоскопический осциллограф (эквивалентного времени). Осциллограф реального времени может захватывать сигналы с очень высокой частотой дискретизации. Это очень полезно, когда вы впервые включаете оборудование PAM-4 и видите только полностью закрытый глазок, чтобы по захваченному сигналу понять, какая нужна коррекция. Однако осциллографы реального времени, как правило, очень дорогие, если сравнивать их стоимость с ценой стробоскопических

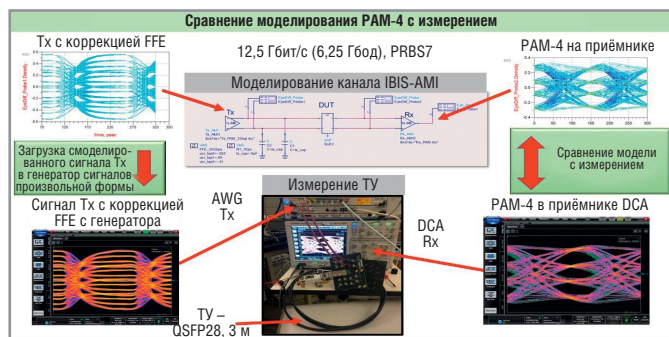


Рис. 7. Подача калиброванного PAM-4 сигнала с коррекцией FFE на тестируемое устройство

осциллографов с той же полосой пропускания. Стробоскопическому осциллографу нужен периодически повторяющийся сигнал, чтобы он мог делать выборки сигнала в разные моменты времени и точно воспроизводить весь сигнал. Точность стробоскопических осциллографов эквивалентного времени, малое отношение С/Ш и специализация на работе с периодически сигналами делает их идеальными приборами для измерения компонентов пассивных каналов и сравнения полученных результатов с результатами моделирования.

Чтобы упростить сопоставление результатов измерения Rx, полученных на стробоскопическом осциллографе, с результатами моделирования, можно воспользоваться функциями калировки осциллографа. Осциллограф можно настроить так, чтобы имитировать заданную полосу и топологию CDR, что позволяет использовать в симуляторе универсальную модель Rx AMI. Осциллограф можно настроить на имитацию простой системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) первого порядка с петлевой полосой пропускания, настраиваемой в соответствии с заданной скоростью передачи данных. На скорости 12,5 Гбит/с (6,25 Гбод) петлевая полоса пропускания устанавливается на 3,25 МГц. На скорости 25 Гбит/с она устанавливается на 7,5 МГц. Чтобы получить плоскую групповую задержку, можно настроить АЧХ приёмника стробоскопического осциллографа в соответствии с характеристикой фильтра Бесселя четвёртого порядка, что позволит избежать пульсаций амплитуды из-за ограничения полосы пропускания прибора.

Теперь, после выбора генератора сигналов произвольной формы в качестве передатчика, QSFP28 в качестве тестируемого устройства и стробоскопического осциллографа эквивалентного

времени в качестве приёмника, можно выполнить реальное измерение. Начав с чистого сигнала PAM-4 без коррекции, мы определяем, что после длинного трёхметрового кабеля QSFP28 глазок полностью закрыт даже на малой скорости 12,5 Гбит/с (6,25 Гбод). Таким образом, для тестирования канала PAM-4 нужно добавить коррекцию. Моделирование упрощает оптимизацию трёхзвенной схемы FFE для снижения потерь в кабеле QSFP28. Затем этот скорректированный сигнал Tx загружается в генератор и измеряется осциллографом, чтобы убедиться, что смоделированный сигнал Tx с коррекцией FFE соответствует воздействию сигналу Tx, используемому в измерении. Дополнительно в симуляторе можно настроить параметры амплитуды, уровень шума и случайный джиттер, что позволяет учесть незначительные отличия от генерируемого сигнала.

После этого калиброванный PAM-4 сигнал с коррекцией FFE подаётся на тестируемое устройство, в качестве которого выступает трёхметровый кабель QSFP28 (см. рис. 7), и наблюдается желанный открытый глазок в приёмнике, как в симуляторе, так и в измерении. На рисунке 7 смоделированный сигнал Tx (слева сверху), обработанный трёхзвенной схемой FFE, экспортирован в генератор сигналов произвольной формы, который генерирует измерительный сигнал Tx (слева внизу). Затем сигнал Rx, принятый на выходе канала тестируемого устройства осциллографом (справа внизу), сравнивается с моделируемым сигналом Rx (справа сверху). На рисунке 8 показано непосредственное сравнение смоделированной и измеренной глазковой диаграммы на стороне приёмника. Обратите внимание, что при этом первом испытании на скорости 12,5 Гбит (6,25 Гбод) с последовательностью PRBS7 наблюдается хорошее согласование модели с измерением.

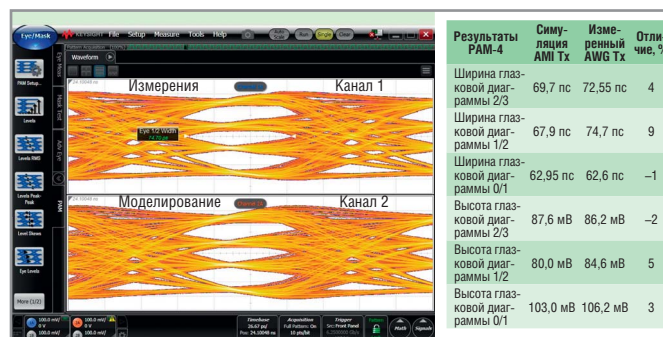


Рис. 8. Сигнал на входе приёмника, включая TV с трёхзвенным FFE: сверху – результат измерения в канале 1А; внизу – результат моделирования в канале 2А

И, наконец, нужно определить лучший метод количественной оценки корреляции модели и измерения. Традиционно, измеренные данные всегда подвергались последующей обработке в среде моделирования, однако современные измерительные приборы содержат уникальные инструменты для быстрого измерения и анализа захваченных сигналов. Мгновенное сопоставление результатов моделирования и измерения в измерительном приборе позволяет отображать смоделированные данные в том же виде, в котором отображаются результаты отбраковки «годен / не годен» в процессе производства.

Здесь можно легко использовать заданные при измерении ширину и высоту глазка для сравнения результатов моделирования и измерения. Такое сопоставление модели с измерением на малых скоростях передачи позволяет проверить методологию и гарантирует, что её можно применить к более высоким скоростям и большим потерям в канале.

Возможность моделировать сигналы с коррекцией FFE в среде симулятора, а затем использовать именно эти сигналы в генераторе сигналов произвольной формы в реальном измерении, позволяет получить великолепную корреляцию модели и измерения для последовательного канала PAM-4. Ключ к успеху здесь кроется в том, чтобы начать с простого случая и убедиться, что отличия между моделью и измерением минимальны. Чтобы проверить методологию, скорость передачи данных следует уменьшить. Затем скорость передачи данных можно повысить и добавить дополнительную коррекцию для компенсации больших потерь. Анализируя генерацию сигнала и измерение сквозного канала PAM-4, инженер лучше понимает, какие элементы наиболее важны для обеспечения корреляции модели с измерением для многоуровневых сигналов.