

БОЛЬШОЙ ШАГ ВПЕРЕД В ИЗМЕРЕНИИ ДЖИТТЕРА

BIG STEPS FORWARD IN JITTER MEASUREMENT

Эндрю Уилсон (Andrew Wilson), Agilent Technologies

Слово «джиттер» применительно к передаче информации стало общим термином для обозначения случайных или периодических отклонений по времени от ожидаемого или заданного момента наступления не случайного события. Это могут быть и отклонения во времени поступления IP-пакетов, и отклонения во времени тактовых сигналов в цифровых системах, и многое другое. Настоящая статья посвящена джиттеру в «транспортных» телекоммуникационных системах, а именно, в системах SONET/SDH.

В этих системах цифровая информация объединяется для передачи в блоки фиксированной величины, или кадры. Цифровая информация внутри кадров выполняет различные функции, например, используется для управления автоматическим защитным отключением, или является платной информацией для клиентов («полезной нагрузкой»), например голосовой с временным разделением каналов, импульсно-кодовой модуляцией и скоростью передачи 64 кбит/с, или информацией в виде IP-пакетов и т. д. Кадры передаются последовательно и побитно, обычно со скоростью 2,5 Гбит/с или 10 Гбит/с. Схема последовательной передачи по сути очень проста — излучение передающего лазера прямо или косвенно модулируется по принципу «да-нет». Совокупность импульсов передатчика может быть отображена на электронно-оптическом осциллографе. При этом фигура в центре осциллограммы, образованная пересечением кривых, обычно называется «глазковой» диаграммой (рис. 1). На ней джиттер виден как перемещение (или размытость) фронтов импульсов по оси времени (горизонтальной) и может быть описан параметрами формы модулирующего сигнала. В случае тест-сигнала джиттера (сигнала, в который джиттер введен преднамеренно) форма волны модулирующего сигнала — обычная синусоида с двумя параметрами, амплитудой и частотой. Как будет видно далее, в отличие от режима проверки, джиттер, реально возникающий в устройствах и цепях (и подлежащий измерению, а не генерированию посредством проверочного оборудования), носит какой угодно характер, но не синусоидальный. Заметим, что амплитуда джиттера измеряется в единицах времени, что при скоростях передачи информации в системах SONET/SDH составляет величину порядка десятков или сотен пикосекунд. Чаще же используется безразмерная единица времени измерения интервала (Unit Interval —

UI, БЕВ), приведенная к длительности периода одного бита.

Возникновение джиттера в телекоммуникационных сетях и устройствах обусловлено тремя основными причинами:

1. Шумы элементов и устройств.
2. Нормальное функционирование элементов сети при прохождении сигналов структуры, принятой в системе SONET/SDH (если два сигнала со слегка различающимися временами поступления объединяются, то структура результирующего сигнала «приспосабливается» к этому различию). В сетях используется высокоточное тактирование и при посылке тактирующих импульсов из главных узлов во все точки сети возможно некоторое отклонение во времени их поступления («блуждание», заслуживающее отдельного рассмотрения), что и порождает джиттер в элементах сети.

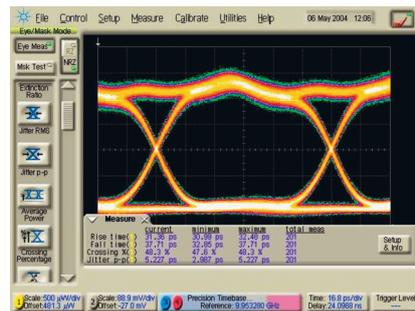


Рис. 1. «Глазковая» диаграмма

3. «Память» цепей — явление зависимости положения каждого последующего импульса от прохождения предыдущих (наблюдается в усилителях, модуляторах, детекторах).

Джиттер особенно заметен в системах передачи, в которых из-за больших расстояний выделение данных на приемном конце производится с использованием тактовых сигналов, восстанавливаемых из того же потока данных. Механизм выделения тактовых импульсов таков, что все вариации времени прихода импульсов отслеживаются, а выборка передаваемой информации производится на середине интервала между тактовыми импульсами, однако число тактовых импульсов, которые механизм выделения может анализировать, быстро уменьшается с ростом частоты джиттера. При сбое этого механизма возникают ошибки в выделении битов с отрицательными последствиями для работы сети передачи. В технических требованиях к сетям, например, ITU-G, обычно задаются предельные значения джиттера, который

вообще допускается, возникает в устройствах или ими передается.

Измерения допустимого уровня джиттера или его передачи относительно просты. Уровень джиттера в этих измерениях достаточно высок и намного выше порога чувствительности по шуму измерительного оборудования. При измерении допустимого уровня джиттера от измерительного оборудования требуется лишь выработка возрастающего по величине джиттера с применением синусоидальной модуляции в целом диапазоне частот. При этом определяются ошибки в передаче отдельных битов, из чего делается вывод о допустимом уровне джиттера на каждой частоте. При измерениях передачи джиттера от измерительного оборудования требуется измерить величину джиттера на выходе устройства как функцию величины джиттера на его входе. Уровни джиттера при этом достаточно высоки, а форма волны измеряемого джиттера определяется формой волны тестового джиттера на входе и обычно близка к синусоидальной. В этих измерениях для контроля уровня джиттера при выходе последнего за пределы определенного диапазона используется следующий фильтр. Указанные измерения обычно производятся автоматически, а результат их оформляется в виде графиков и таблиц с указанием допустимых пределов уровней джиттера согласно различным сетевым стандартам. По-настоящему трудными являются измерения генерации джиттера (или измерения выходного джиттера, внутреннего джиттера), когда речь идет об очень малых величинах джиттера, порождаемого самим устройством или отдельным элементом. Значения заданных стандартами уровней генерации джиттера обычно достаточно низки, примерно 0,1 БЕВ «от пика до пика» (pk-pk).

Сейчас появился большой интерес к измерениям джиттера, возникающего в оптических компонентах. Это вызвано, в частности, перспективой снижения затрат при использовании новейших разновидностей оптических XFP-передатчиков вместо используемых в настоящее время 300-контактных устройств MSA, известных также как транспондеры. В устройствах XFP нет присущих транспондеру встроенных функций мультиплексирования и синхронизации; это сделано для удешевления, упрощения и снижения энергопотребления. Однако уровень джиттера при этом выше, особенно при неточном согласовании по входу.

Вообще говоря, те, кто использует оборудование для измерения джиттера, уже привычны к тому, что разброс результатов измерения на одном и том же оборудовании (а тем более, на разном) достаточно велик. Частично это происходит из-за того, что результат измерения времени «от пика до пика» сильнее всего зависит от характеристик джиттера, уровень которого измеряется. В ходе измерений может случиться, что отдельный пик сигнала появится в одном

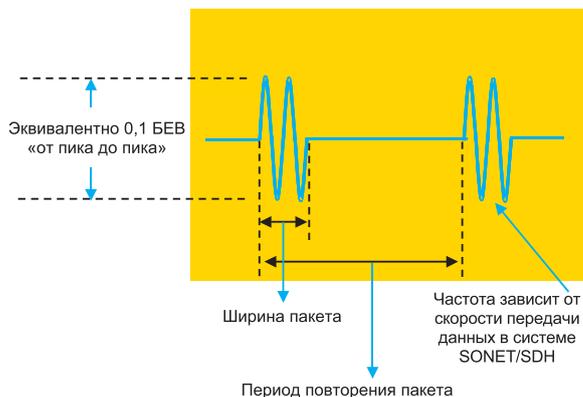


Рис. 2.

измерении и не появится в другом. Чем дольше измерение, тем больше вероятность того, что пик сигнала будет обнаружен. Однако есть возможность снизить общую погрешность измерений, усовершенствовав средство измерения.

При измерении генерации джиттера возникает три основных проблемы:

1. Трудность создания измерителя уровня джиттера без своего «внутреннего» джиттера.

2. Поскольку часто требуется измерить среднеквадратичное значение джиттера, а измерение производится «от пика до пика», то даже один-единственный пик будет обнаружен и измерен. И именно этот пик искажает результат измерения.

3. До настоящего времени не найден способ калибровки измерителя джиттера при малых значениях последнего и с любой реальной точностью.

Проблемы отсутствия «внутреннего» джиттера и качества определения пика могут быть решены лишь созданием хорошей схемотехники аналоговых цепей для обнаружения и измерения джиттера. Здесь невозможно использовать ни последующую обработку результатов измерений, ни корректировку их с помощью программного обеспечения. Поэтому, хотя и принято считать, что измерительное оборудование для системы SONET/SDH должно быть только цифровым, для измерения джиттера требуется прецизионное средство радиочастотного диапазона типа анализатора электрических цепей или анализатора спектра. Одной из наиболее важных частей измерителя джиттера является фотодетектор на оптическом входе, причем этот фотодетектор должен быть линейным. Также очень важ-

но пропустить сигнал с фотодетектора через фильтр до подачи его на схему восстановления тактирующих импульсов с целью подавления эффектов, порожденных принципом модуляции лазера (выбросы на фронте и затухающие колебания). Успешное решение этих аспектов сводит к минимуму зависимость результата измерения джиттера от мгновенной конфигурации сигнала.

Калибровка измерительного приемника джиттера должна сохраняться при любом виде джиттера — будь то устойчивая синусоида или одиночные импульсы. В технических требованиях к сетям ITU (O.172, приложение 7) все возможные виды джиттера сведены к некоторой совокупности форм сигнала (в пределах определенных диапазонов). Эти формы основаны на пакетах синусоидальных сигналов, характеризующихся шириной пакетов и периодом их повторения (рис. 2).

В приложении 7 документа ITU O.172 уровень 0,1 БЕВ «от пика до пика» определен как точка отсчета, на уровне которой отсчитываются значения джиттера для всех выбранных форм сигнала. Результат измерения сигнала в данном случае не зависит от его формы, в отличие от обычных аналоговых измерений мощности сигнала, очень сильно зависящих от его формы.

Очень важный момент: никакие изменения других параметров стандарт-

ных последовательностей единиц или нулей, которые могут вызвать сбой в выделении тактовых импульсов), служебный кадр шифруется не полностью. В приложении 7 документа ITU O.172 рекомендуется метод под названием «оптическая ресинхронизация» (см. ниже), при котором достигается полная независимость калибровочного сигнала от момента калибровки, а в калибровочном сигнале имеется только тот джиттер, который введен в него намеренно.

Калибровочная система (рис. 3) состоит из тактового генератора с источником модулирующего сигнала, узла калибровки джиттера (с использованием обычного осциллографа и анализатора спектра для измерения величины джиттера в тактовом сигнале) и высокоточного генератора данных в оптическом виде. С помощью осциллографа и анализатора спектра можно убедиться, что выходной оптический сигнал полностью одноуровневый, т. е. величина джиттера в нем составляет 0,1 БЕВ «от пика до пика» для любой ширины пакета и периода повторения.

«Оптическая ресинхронизация», реализуемая с помощью высокоточного генератора данных в виде оптического сигнала, нуждается в пояснении. Лазер, модулятор излучения лазера данными и генератор электрических модулирующих сигналов данных ничем не отличаются от тех, что используются в любой контрольно-измерительной аппаратуре системы передачи SONET/SDH. Однако в оптическом сигнале на выходе мо-

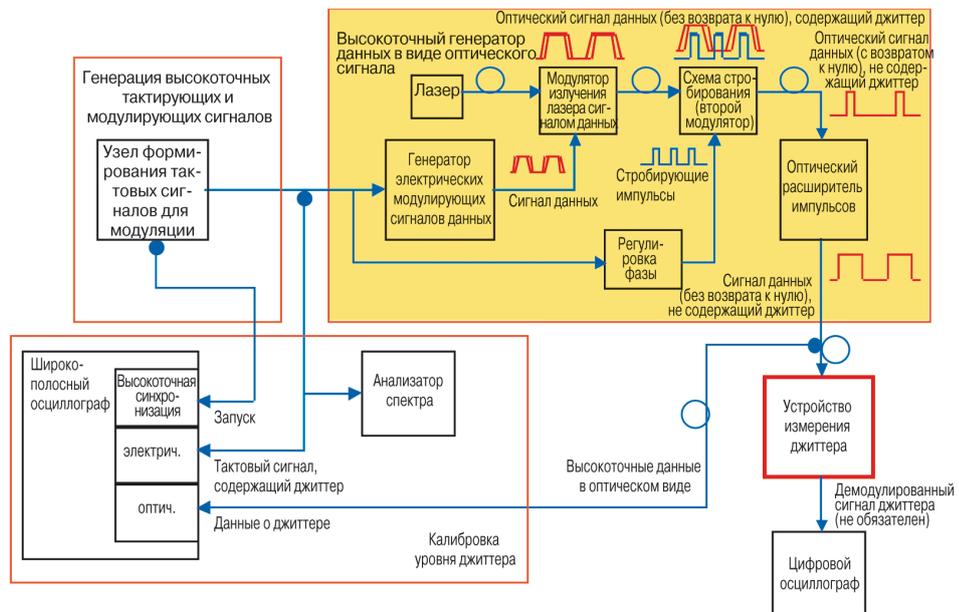


Рис. 3. Схема калибровочной системы

ного сигнала (например, образцового цифрового сигнала PRBS, являющегося служебным в системе SONET/SDH) не влияют на стандартный уровень 0,1 БЕВ «от пика до пика». И хотя сигналы в системе SONET/SDH шифруются (для того, чтобы избежать очень длин-

дуются данными может присутствовать джиттер, связанный с шумами и зависящий от конфигурации сигнала в данный момент. Для исключения этого джиттера выходной сигнал модулятора вновь модулируется путем стробирования импульсами, представляющими со-

бой тактовые импульсы с преднамеренно измененной фазой. Поскольку повторная модуляция (стробирование) производится тактовым сигналом, отличным от сигнала данных, джиттер, зависящий от конфигурации сигнала в данный момент времени, невозможен в принципе. Импульсы, которыми производится повторная модуляция, имеют малую ширину, а их фаза подобрана так, чтобы стробирование выходного сигнала первого модулятора происходило по центру «глаза» (см. рис. 1). Это

печивает низкий уровень шума и является калиброванным источником джиттера, не зависящего от конфигурации сигнала в данный момент времени. Такой источник можно использовать при изготовлении и периодических recalibration приемных устройств аппаратуры измерения джиттера в системе SONET/SDH (серия OmniBER, компания Agilent). Предполагается, что и другие компании-производители аналогового оборудования будут использовать подобную технику.

ром описывается техника измерения джиттера на передатчике (не на приемнике) измерительного оборудования. В этом приложении имеются некоторые ошибки, что делает его пока непригодным для практического использования, однако их исправление — дело времени. Как уже упоминалось, для промышленности не представляют особой проблемы измерения, в ходе которых происходит передача сигналов с известным уровнем джиттера (например, измерения допустимого уровня джиттера), поэтому Приложение 8 пока не находит применения в реальных измерениях. Важно подчеркнуть, что Приложение 8 само по себе не может служить основой для формирования стандартного калибровочного сигнала джиттера по двум основным причинам:

1. В Приложении 8 не определены ни форма сигнала джиттера, ни способ ее контроля. По сути, речь идет об измерении джиттера, изменяющегося по синусоидальному закону, т. е. всего одной точке на карте точности. Как по этой точке построить плоскость карты точности, в Дополнении 8 не определяется.

2. В Приложении 8 не определен способ контроля джиттера, зависящего от мгновенной конфигурации сигнала, речь идет лишь о некоторых базовых тестовых конфигурациях.

Приложение 8 в любом случае не является альтернативой Приложению 7; последнее остается единственным имеющим силу стандарта документом, определяющим характеристики измерителей джиттера на выходе. Для измерений малых уровней джиттера это большой шаг вперед в смысле точности и воспроизводимости. На этой основе возможно широкое внедрение более дешевых оптических компонентов телекоммуникационного оборудования без ущерба для качества или рентабельности. Проверка на джиттер наконец-то стала точной, воспроизводимой и поставленной на документальную основу — так же, как и в других областях измерений.

ЛИТЕРАТУРА:

1. ITU-T O.172 (<http://www.itu.int/publications/index.html>)
2. Understanding Jitter and Wander Measurements and Standards (<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5988-6254EN.pdf>)

The word «jitter» in the communications context means in general any random or periodic variations in timing of a regular event from its intended or nominal timing. This article will discuss specifically timing jitter on telecommunication «transport» systems.

Карта точности (в соответствии с ИТУ-Т О.172 дополнение 7)

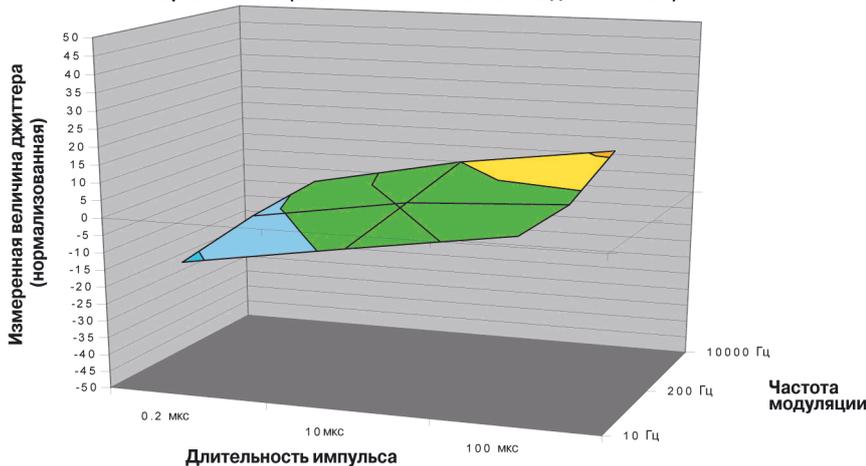


Рис. 4. «Карта точности»

позволяет избежать джиттера, который всегда присутствует на краях «глаза» (т. е. на фронтах).

После второй модуляции (стробирования) результирующий оптический сигнал представляет собой сигнал с возвратом к нулю (вследствие малой ширины стробирующих импульсов). Чтобы преобразовать такой сигнал в сигнал без возврата к нулю, используется расширитель оптических импульсов. Очень важно, что последний сам по себе не вносит джиттер. Можно было бы узкие оптические импульсы преобразовать в электрические сигналы с последующим расширением, однако это неминуемо приведет к появлению джиттера, подавить который уже не представляется возможным. В оптическом же варианте расширения импульсов используется оптоволокно с двойным лучепреломлением (в котором скорость распространения света зависит от его поляризации). При этом оптический сигнал подвергается расщеплению и задержке без преобразования в сигнал электрический и без искажения импульсов. Согласно приложению 7 документа ИТУ О.172 для снижения джиттера, зависящего от конфигурации сигнала в данный момент, в некоторых случаях допускается использование оптического передатчика в «нетиповом» режиме (например, использование частоты передачи информации 2,5 Гбит/с вместо «нормальной» частоты 10 Гбит/с).

В целом рассмотренная схема обес-

На рис. 4 приведена так называемая «карта точности», полученная путем наложения джиттера всех типовых форм сигнала на стандартный сигнал и последующего графического отображения выходного сигнала измерителя джиттера для каждой формы сигнала.

Идеальная карта точности является плоской и располагается на уровне 0,1 БЕВ для всех форм сигнала. Чем ближе реальная карта к идеальной, тем выше качество приемного устройства джиттера в составе измерительного оборудования.

После построения «базовой» карты точности калибровка сводится к центрированию карты относительно номинального уровня 0,1 БЕВ. При этом имеет значение тщательность разработки аналоговых цепей. Такой способ калибровки вполне приемлем, но точность оборудования после такой калибровки зависит от того, насколько карта точности близка к плоскости.

Полезно также построить более сложную пространственную карту точности с учетом различных условий окружающей среды, уровней джиттера отличных от 0,1 БЕВ «от пика до пика» и особенностей конкретного образца оборудования. В этом случае результат любого измерения в любое время на любом образце оборудования одного и того же типа попадет в область, ограниченную пространственной картой точности.

Сейчас в документе О.172 появился новый раздел (Приложение 8), в кото-