

# МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ШУМА В ЦИФРОВЫХ СХЕМАХ

АЛЕКСЕЙ ИГНАТОВ, техн. консультант, «ИД Электроника»

В статье рассмотрены методы оценки джиттера в канале передачи. Отмечены достоинства и недостатки каждого подхода.

## ГЛАЗКОВАЯ ДИАГРАММА

Глазковая диаграмма — это суммарный вид всех битовых периодов измеряемого сигнала, наложенных друг на друга. Глазковая диаграмма строится путем измерения напряжения в различные моменты времени. На рисунке 1 слева приведены все варианты последовательностей из трех битов и их аналоговое представление. Накладывая эти сигналы друг на друга, получаем глазковую диаграмму. Глазковая диаграмма позволяет быстро и наглядно оценить качество цифрового сигнала, показывая все варианты последовательностей, в т.ч. длинные передачи логических нулей или единиц, которые часто выявляют слабые места в системе.

Проведем аналогию. Как правило, в приемнике есть компаратор, который по амплитуде принятого сигнала распознает его как логический ноль или логическую единицу. Чтобы избежать появления ошибок, амплитуда сигнала анализируется только после установления всех переходных процессов. При анализе глазковой диаграммы применяется такой же подход, т.е. пробную точку ставят в середину глазка, где вероятность возникновения ошибки минимальна, особенно при наличии четкой пологой области. По мере приближения к точке пересечения вероятность появления ошибок растет.

Заметим, что глазковая диаграмма показывает только параметры сигнала. С помощью нее нельзя обнаружить логические ошибки в алгоритмах или протоколах, а — только ошибки, вызванные большим уровнем помех или искажений в канале передачи.

Основными параметрами глазковой диаграммы являются время фронта, время спада, коэффициент раскрытия глазка, высота и ширина глазка, относительная ширина места пересечения.

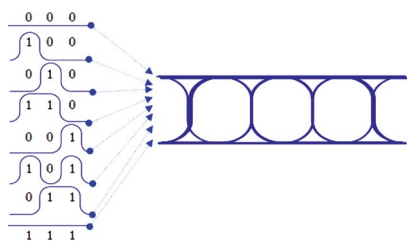


Рис. 1. Принцип построения глазковой диаграммы

Второй параметр, характеризующий канал связи — это вероятность принятия ошибочного бита, которая вычисляется как отношение количества ошибочно принятых битов к общему количеству принятых битов (BER — bit error ratio). Этот показатель характеризует только качество приема информации, по нему невозможно определить причину плохой работы.

Таким образом, ни один из рассмотренных способов не дает полного описания цифрового сигнала. У каждого подхода есть свои недостатки. Так, для современных быстродействующих устройств глазковая диаграмма — слишком поверхностный метод оценки, способный сильно исказить результат. Действительно, выборки для глазковой диаграммы делаются с частотой на несколько порядков меньшей, чем частота передачи. К примеру, осциллограф может делать до 100 тыс. выборок в секунду, однако для сигнала 10 Гбит/с — это очень низкая скорость. Качество передачи сигнала определяется по очень малой доле данных. Следовательно, глазковая диаграмма помогает выявлять в основном систематические ошибки, а не одиночные или редкие события. В итоге у сигнала может быть хорошая глазковая диаграмма, а качество передачи — плохое. Обычно современные системы передачи должны иметь вероятность появления ошибки не ниже  $10^{-12}$ , а часто на уровне  $10^{-15}$ , в то время как глазковая диаграмма отслеживает ошибки только с вероятностью не меньше  $10^{-5}$ .

Для устранения этого недостатка существуют два подхода: использовать анализаторы с большей частотой дискретизации, например, тестеры BERT, которые делают выборки в среднем на три порядка больше, чем цифровые осциллографы. Другой вариант —

использовать способность анализаторов BERT делать выборки сигнала напрямую, на скорости передачи.

Недостаток измерения шума по глазковым диаграммам заключается не только в малом количестве анализируемых данных, но и в том, что сигнал оценивается разными способами. Другими словами, результат будет во многом зависеть от типа используемого инструмента. На практике для более надежного определения уровня шума пользуются несколькими методами поочередно.

## ГИСТОГРАММА

Для определения параметра BER наиболее информативно место пересечения глазков. На рисунке 2 изображена глазковая диаграмма и гистограмма распределения выборок в точке пересечения. Гистограмма представляет собой распределение вероятности появления ошибки. На рисунке 3 показана область перехода на глазковой диаграмме и соответствующая гистограмма ошибки временного интервала (TIE — Time Interval Error). На глазковой диаграмме прослеживаются две отдельные линии фронтов и спадов, что указывает на присутствие в канале систематического шума. Размытость линий свидетельствует о наличии случайного шума. На гистограмме четко видны две области с максимальной вероятностью неверного распознавания бита.

При анализе величины BER с помощью гистограммы следует иметь в виду, что результат измерения во многом зависит от длительности тестирования. Так, значение BER, полученное при быстром анализе, будет значительно отличаться от значения, полученного на том же анализаторе, но после нескольких часов непрерывного измерения.

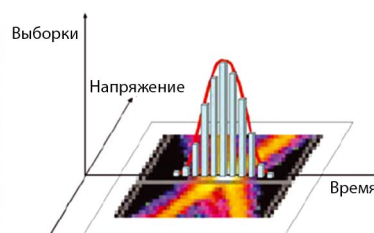
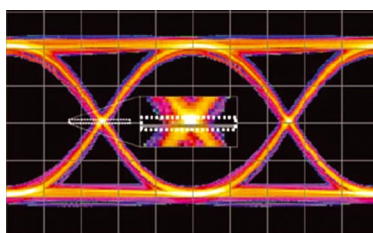


Рис. 2. Глазковая диаграмма (слева) и гистограмма распределения выборок в области перехода

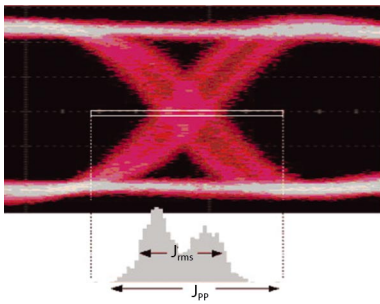


Рис. 3. Гистограмма ошибки временного интервала в области перехода на глазковой диаграмме

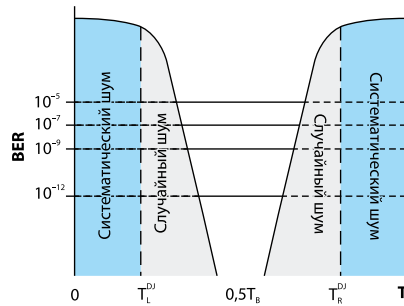


Рис. 4. U-образная кривая

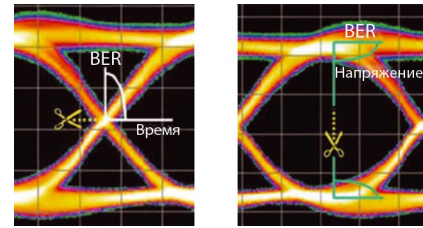


Рис. 5. Распределение BER в двух плоскостях на глазковой диаграмме

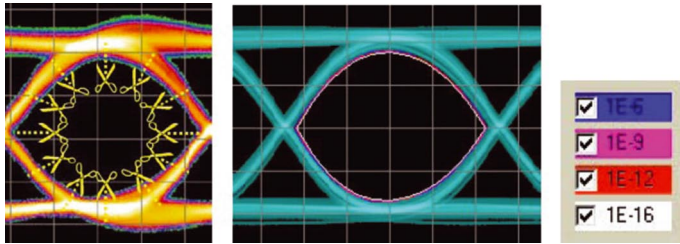


Рис. 6. Построение контура BER

В связи с этим в некоторых стандартах требуемый уровень BER приводится с указанием времени измерения.

#### U-ОБРАЗНАЯ КРИВАЯ

Часто при анализе шума удобно использовать U-образную кривую. Она представляет собой график зависимости частоты появления ошибочных битов (BER) от положения пробной точки на единичном интервале (T). В области пересечения на глазковой диаграмме BER = 0,5 (равная вероятность правильного и неверного определения бита). В этой области преобладает механизм детерминированного джиттера, кривая идет полого (моменты T = 0 и T = T<sub>b</sub> на рисунке 4). По мере продвижения пробной точки к центру единичного интервала BER стремительно уменьшается, и усиливается влияние случайного шума. Оптимальное положение пробной точки — в центре единичного интервала (глаза).

Помехоустойчивость системы определяется расстоянием между ветвями U-образной кривой. Чем дальше нахо-

дится левая ветвь кривой от правой при определенном BER, тем больше запас устойчивости к джиттеру.

#### КОНТУР BER

Если мысленно сделать горизонтальный разрез области перехода на глазковой диаграмме, то будет получен профиль распределения битов. Второе измерение, которое проводится по глазковой диаграмме, делается относительно вертикального разреза в центре глаза. Полученный профиль позволяет судить о величине шума в канале и оценить его влияние на качество связи.

На рисунке 5 показано распределение BER в области перехода на глазковой диаграмме и на пологой вершине. Комбинируя эти измерения, можно получить контур вероятности появления ошибки (BER Contour). Многие цифровые осциллографы, тестеры и анализаторы шума имеют такую функцию. Для построения линии BER пробная точка смещается по всему глазу, делая разрезы под произвольными углами (см. рис. 6).

Для быстрой оценки пригодности системы проводится сравнение с маской (mask testing). Вместо измерения параметров глаза в этом случае определяются ключевые области, в которые передаваемый сигнал не должен попадать (см. рис. 7). В противном случае система признается неработоспособной. В качестве маски может использоваться контур BER. Анализ занимает несколько секунд, однако он, как и глазковая диаграмма, достаточно поверхностный, поэтому позволяет обнаружить только систематические ошибки, а не одиночные события.

BER Contour можно сделать более наглядным, если перевести его в трехмерный режим с помощью инструмента Eye Bowl. На рисунке 8 приведена объемная структура контуров BER. Верхние слои в этой структуре обозначают высокий уровень BER порядка  $10^{-2}$ , а нижние — низкую вероятность появления ошибки (около  $10^{-16}$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Guy Foster. *Anatomy of an Eye Diagram — a Primer.*
2. Guy Foster. *Bridging the Gap Between BER and Eye Diagrams — A BER Contour Tutorial.*
3. Guy Foster. *Measurements of Pre-Emphasis on Altera® Stratix® GX with the BERTScope 12500A.*
4. Измерение джиттера в цифровых системах/ [www.unitest.com](http://www.unitest.com).
5. Guy Foster. *Measurement Brief: Examining Sampling Scope Jitter Histograms.*

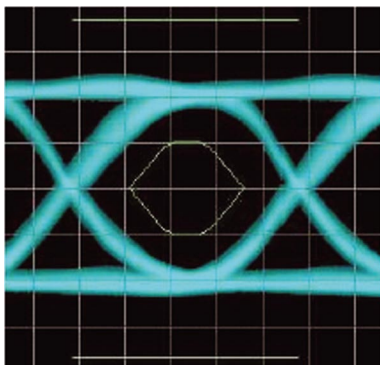


Рис. 7. Анализ сигнала с помощью маски

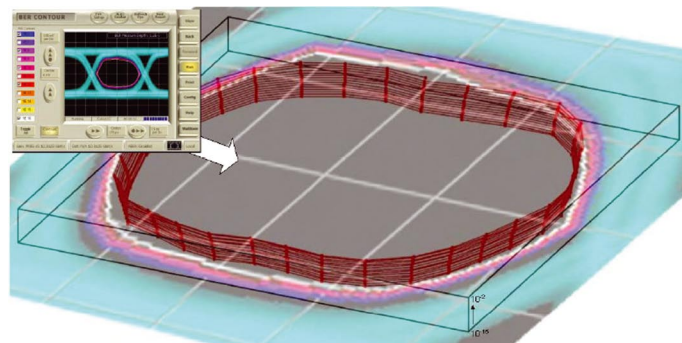


Рис. 8. Представление структуры контуров BER в трехмерном виде