

УДК 621.39(045)

¹О. П. Ткалич, канд. техн. наук,
²А. А. Дятлов,
³Р. А. Мамаев,
⁴Д. Ю. Нечай

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛАЗКОВЫХ ДИАГРАММ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

¹Институт інформаційно-діагностичних систем НАУ, e-mail: tkalich1@rambler.ru,

²Институт інформаційно-діагностичних систем НАУ, e-mail: dalex@zeos.net,

³Институт інформаційно-діагностичних систем НАУ, e-mail: gansditrih@ukr.net,

⁴Институт інформаційно-діагностичних систем НАУ, e-mail: denikey@bigmir.net

Рассмотрен один из самых перспективных методов анализа цифровых сигналов – метод глазковых диаграмм. Подробно описаны основные параметры цифровых сигналов, которые могут отобразить их качественные показатели и которые можно измерить при помощи данного метода, а также проведен анализ на примере двух глазковых диаграмм.

Ключевые слова: глазковая амплитуда, глазковая задержка, глазковая ширина, вертикальное глазковое открытие, добротность, детерменистический джиттер.

Вступление. Помимо достаточно хорошо известных методов аналоговых сигналов с использованием осциллограмм и спектрального анализа, в методологии измерений цифровых сигналов широкое распространение получило представление в виде специальных диаграмм, что определяются дискретной природой сигналов. При проведении измерений получили распространение два основных класса диаграмм: диаграммы физических параметров цифрового сигнала – глазковые диаграммы и диаграммы состояний и алгоритмические диаграммы – древовидные диаграммы и различные виды диаграмм Треллиса.

Диаграммы физических параметров используются для анализа как простых бинарных цифровых сигналов, так и сложных сигналов современных цифровых телекоммуникаций – многоуровневых (например сигналы линейного кодирования ISDN) и модулированных сигналов (применяемых в радиочастотных системах передачи и системах радиосвязи).

Постановка задачи. Провести анализ методов исследования цифровых сигналов, отвечающих требованиям, предъявляемым к современным телекоммуникационным системам и сетям. Исследовать возможность и перспективность применения глазковых диаграмм для анализа цифровых сигналов.

Построение глазковой диаграммы. Для построения двухуровневой глазковой диаграммы (рис. 1) битовый поток подается на осциллограф, в то время, как синхронизация внешней развертки производится от битового потока частотой f_b . В случае построения многоуровневых диаграмм сигнал должен проходить через многоуровневый конвертер, а синхронизация производится от символьного потока частотой f_s . Для калибровки глазковой диаграммы сигнал часто подают в обход фильтра, ограничивающего диапазон сигнала. В этом случае возникает диаграмма в виде прямоугольника (табл. 1, слева). Фильтр, ограничивающий полосу передаваемого сигнала, вносит существенные изменения в форму импульса, в результате чего возникает диаграмма в виде «стандартного глаза» (табл. 1, справа). Глазковые диаграммы используют периодическую структуру цифрового сигнала. За счет внешней синхронизации развертки получаемые осциллограммы волнового фронта сигнала накладываются друг на друга с периодом одного отсчета. В результате проведения измерений с накоплением получается глазковая диаграмма, при этом по оси ординат откладывается амплитуда сигналов, по оси абсцисс – время соответственно.



Рис. 1. Построение глазковой диаграммы: ПСП – псевдослучайная последовательность

Пример формирования глазковой диаграммы непосредственно на выходе источника и на выходе линейного тракта приведен в табл. 1.

Таблица 1

Цифровая последовательность

Двоичный код	Формирование глазковой диаграммы непосредственно на выходе источника	Формирование глазковой диаграммы на выходе линейного тракта
000		
001		
010		
011		
100		
101		
110		
111		
Суперпозиция		

Реальная осциллограмма сигнала «разрезается» посимвольно в соответствии с тактовыми импульсами синхронизирующего генератора, а затем глазковая диаграмма «складывается» из полученных кусков.

В идеальном случае при отсутствии цепей фильтрации в результате такого сложения получится квадрат («квадратный глаз»). Однако глазковая диаграмма реального сигнала будет значительно отличаться от квадрата, поскольку будет содержать в себе составляющие нарастания фронта сигнала, спада фронта, прямоугольный импульс будет иметь форму колокола, в результате получится диаграмма, более похожая на глаз.

Исследование глазковых диаграмм позволяет провести детальный анализ цифрового сигнала по параметрам, непосредственно связанным с формой волнового фронта: параметру межсимвольной интерференции, джиттеру передачи данных, джиттеру синхронизации и другим характеристикам.

Параметры глазковых диаграмм. Таким образом, глазковая диаграмма (рис. 2) представляет собой результат многократного наложения битовых последовательностей с выхода генератора ПСП, отображаемый на экране осциллографа в виде диаграммы распределения амплитуды сигнала по времени.

Эффекты уширения импульса, а также фазовое дрожание сигнала вызывают появление взаимных искажений между символами, что приводит к пересечению глазковой диаграммы с

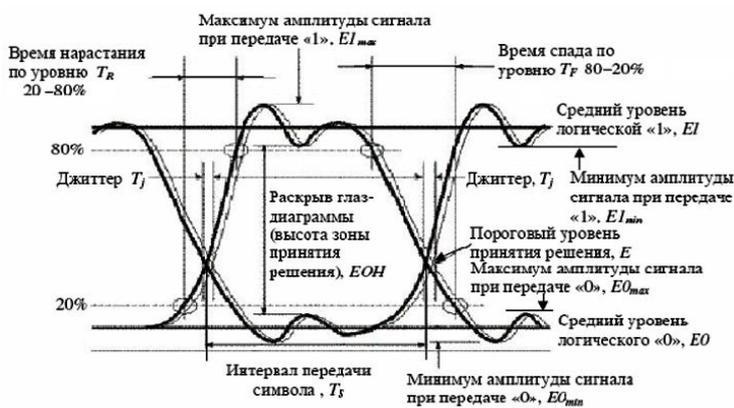


Рис. 2. Глазковая диаграмм и ее основные параметры

временной осью в разные промежутки времени. Максимальная ширина области пересечения с временной осью определяется как пиковое фазовое дрожание или джиттер передачи данных T_j .

Исследование глазковых диаграмм позволяет провести детальный анализ цифрового сигнала по следующим параметрам:

Вы можете провести следующие измерения с помощью глазковых диаграмм:

Таблица 2

Измерения амплитуды	Временные измерения
Глазковая амплитуда	Период глазкового пересечения
Амплитуда глазкового пересечения	Глазковая задержка
Процентное соотношение глазкового пересечения	Время глазкового затухания
Процентное соотношение глазкового пересечения	Время глазкового нарастания
Глазковая высота	Глазковая ширина
Глазковый уровень	Горизонтальное глазковое открытие
Глазковое отношение сигнал/шум	Джиттер полного размаха
Добротность	Случайный джиттер
Вертикальное глазковое открытие	Среднеквадратический джиттер
	Полный джиттер

Измерения детерминированного джиттера, горизонтального открытия глаза, коэффициента качества, случайного колебания, и вертикального открытия используют алгоритм *dual-Driac*. Джиттер – это отклонение уровня сигнала в определенное время от его намеченного (идеального) значения в это время [4]. Джиттер может быть представлен моделью *dual-Driac*. *Dual-Driac* модель предполагает, что джиттер имеет два компонента: детерминистический джиттер (DJ) (рис. 3, а) и случайный джиттер (рис. 3, б) (RJ). DJ PDF (*probability distribution function* – функция распределения вероятностей) включает в себя две дельта-функции, одну в μ_L и одну в μ_R . Предполагается, что RJ PDF является гауссовской функцией с нулевым средним значением и дисперсией σ .

Полный джиттер (TJ) PDF (рис. 3, в) – это свертка двух вышеперечисленных PDF , которая состоит из двух гауссовских кривых (кривая нормального распределения (вероятностей)) с дисперсией σ и средними значениями μ_L и μ_R .

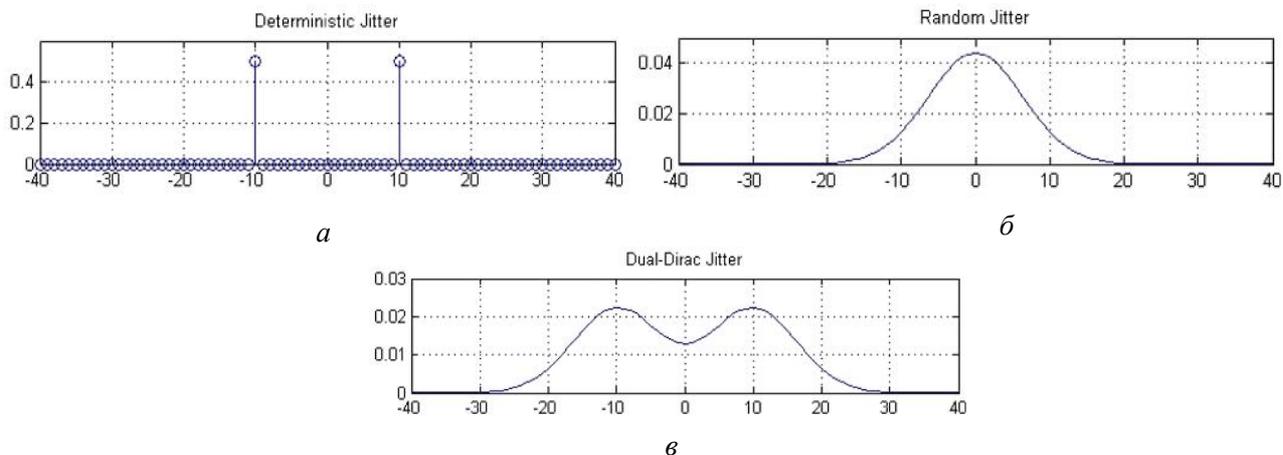


Рис. 3. Джиттеры: *a* – детерминистический; *б* – случайный; *в* – полный

Рассмотрим параметры сигнала, которые измеряются с помощью глазковых диаграмм более детально.

Измерения амплитуды. Можно использовать вертикальную гистограмму для получения различных измерений амплитуды. Для комплексных сигналов измерения проводятся как на синфазные, так и на квадратурные составляющие, если не определено иначе. Для измерений амплитуды по крайней мере один отсчет в вертикальной гистограмме должен достигать 10 изменений прежде, чем было проведено измерение, гарантируя более высокую точность

Глазковая амплитуда (*EyeAmplitude*). Глазковая амплитуда, измеряемая в единицах амплитуды (AU), является расстоянием между двумя соседними глазковыми уровнями. Для NRZ сигнала существует только два уровня: высокий (уровень 1 на рисунке) и низкий (уровень 0 на рисунке). Глазковая амплитуда – разница этих двух величин [4], как показано на рис. 4.

Амплитуда глазкового пересечения (*Eye-CrossingLevel*). Амплитуда глазкового пересечения (рис. 5) – это уровни амплитуды, на которых происходят глазковые пересечения; измеряется в единицах амплитуды (AU). Метод анализа состоит в вычислении этой величины с использованием среднего значения вертикальной гистограммы в моменты пересечения [4].

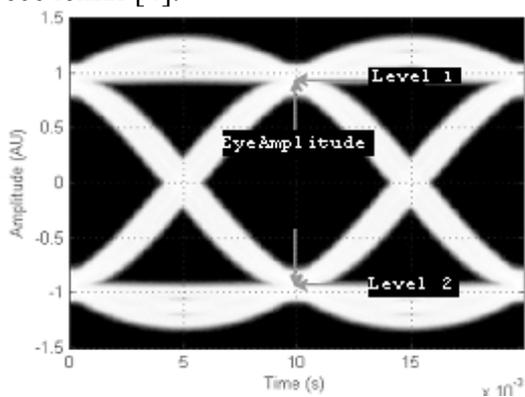


Рис. 4. Глазковая амплитуда

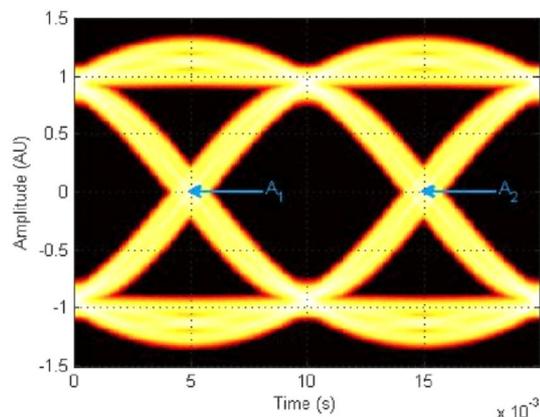


Рис. 5. Амплитуда глазкового пересечения

Рис. 6 показывает вертикальную гистограмму в момент первого глазкового пересечения.

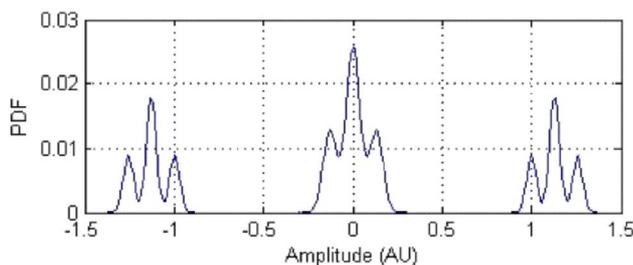


Рис. 6. Вертикальная гистограмма в момент первого глазкового пересечения

Процентное соотношение глазкового пересечения (*EyeOpeningVer*). Процентное соотношение глазкового пересечения – это уровень, на котором находится нулевое глазковое пересечение, вычисленное как процентное отношение от глазкового открытия. Вычисляют по формуле

$$Crossing\ Percentage = \frac{P_{cross} - P_{base}}{P_{top} - P_{base}} \cdot 100,$$

где P_{cross} – уровень, на котором произошло первое глазковое пересечение; P_{top} – средний уровень наиболее преобладающего пика гистограммы, построенной для высокого логического уровня; P_{base} – средний уровень наиболее преобладающего пика гистограммы, построенной для низкого логического уровня.

Глазковая высота (*EyeHeight*). Глазковая высота (рис. 7) измеряется в единицах амплитуды (AU), определяется как расстояние 3σ между двумя соседними глазковыми уровнями.

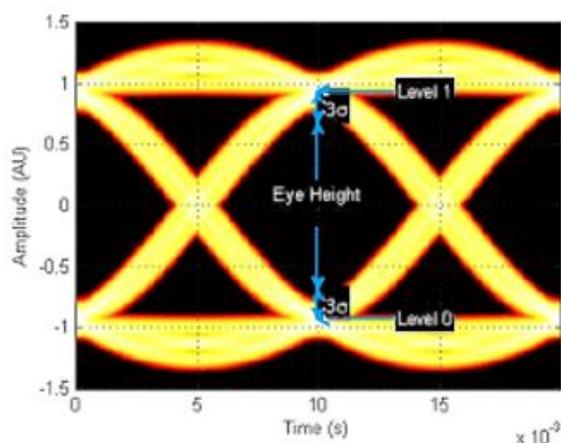


Рис. 7. Глазковая высота

Для NRZ-сигнала существует только два уровня: высокий (уровень 1 на рисунке) и низкий (уровень 0 на рисунке). Глазковая высота – это разница двух 3σ точек, как показано на рис. 5. 3σ точка - точка, которая находится на расстоянии трех стандартных девиаций от средней величины PDF.

Глазковый уровень (*EyeLevel*). Глазковый уровень – это уровень амплитуды, используемый для представления битов данных, измеряется в единицах амплитуды (AU).

Для идеального NRZ-сигнала существуют два глазковых уровня: $+A$ и $-A$. Метод анализа состоит в вычислении глазковых уровней путем оценки среднего значения вертикальной гистограммы в окне вокруг глазковой задержки (*EyeDelay*), которая также является серединой (50 %-й) точкой между моментами глазкового пересечения [4]. Ширина этого окна определяется с помощью свойства границы глазкового уровня (граничного,

EyeLevelBoundary) объекта *eyemeasurementsetup* (установок глазковых измерений), показанного на рис. 8.

Метод анализа состоит в вычислении среднего значения всех вертикальных гистограмм в пределах границ глазкового уровня. Средняя вертикальная гистограмма показана на рис 9. Существует две различных *PDF* для каждого глазкового уровня. Средние величины индивидуальных гистограмм – это глазковые уровни (рис. 9).

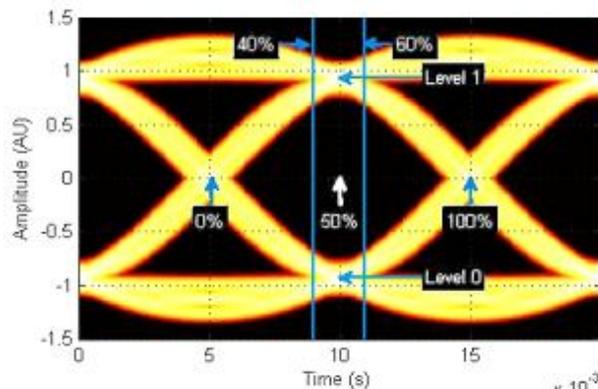


Рис. 8. Глазковый уровень

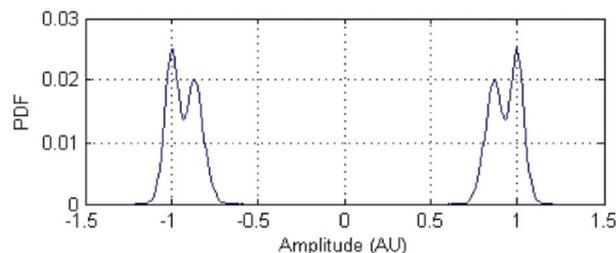


Рис. 9. Средняя вертикальная гистограмма

Глазковое отношение сигнал – шум (*EyeSNR*). Глазковое отношение сигнал/шум определяется как отношение глазковой амплитуды к сумме стандартных девиаций двух глазковых уровней. Это может быть выражено как

$$SNR = \frac{L_1 - L_0}{\sigma_1 - \sigma_0},$$

где L_1 и L_0 – глазковые уровни 1 и 0; σ_1 и σ_0 – стандартные девиации глазковых уровней 1 и 0 соответственно.

Для *NRZ*-сигнала глазковый уровень 1 соответствует высокому уровню, а глазковый уровень 0 – низкому уровню.

Добротность (*QualityFactor*). Метод анализа состоит в вычислении *добротности* так же, как в вычислении отношения глазкового сигнал/шума. Однако вместо использования величин средней и стандартной девиации вертикальной гистограммы L_1 и σ_1 используются величины средней и стандартной девиации, полученные методом *dual-Driac*. [4]. Вычисляют по формуле

$$Q\ factor = \frac{P_{top} - P_{base}}{\sigma_{top} + \sigma_{base}} \cdot 100,$$

где P_{top} – средний уровень наиболее преобладающего пика гистограммы, построенной для высокого логического уровня; P_{base} – средний уровень наиболее преобладающего пика гистограммы, построенной для низкого логического уровня; σ_{top} – стандартная девиация для средней величины высокого логического уровня, σ_{base} – стандартная девиация для средней величины низкого логического уровня.

Вертикальное глазковое открытие (*EyeOpeningVer*). Вертикальное глазковое открытие определяется как вертикальное расстояние между двумя точками на вертикальной гистограмме при глазковой задержке (*EyeDelay*), которая соответствует значению коэффициента интенсивности ошибочных битов (*Bit Error Rate, BER*), определяемому с помощью свойства порога *BER* (*BERThreshold*) объекта *eyemeasurementsetup*. По методу анализа вычисления производится с учетом случайных и детерминистических компонентов с

использованием модели *dual-Driac* [4]. Типичное значение интенсивности ошибочных битов для измерения глазкового открытия составляет 10^{-12} , что приблизительно соответствует точке 7σ с учетом гауссовского распределения.

Временные измерения. Можно использовать горизонтальную гистограмму глазковой диаграммы, чтобы получить большое количество временных измерений. Для временных измерений до проведения измерений по крайней мере один уровень сигнала по горизонтальной гистограмме должен достигнуть 10 отсчетов.

Детерминистичный джиттер (*Deterministic Jitter*). *Детерминистичный джиттер* – это детерминистичный компонент колебания. Он вычисляется с помощью значения остаточной (*tail*) средней величины, которая находится по методу *dual-Driac* следующим образом [4]:

$$DJ = \mu_L - \mu_R,$$

где μ_L и μ_R – средние величины, возвращенные алгоритмом *dual-Driac*.

Период глазкового пересечения (*EyeCrossingTime*). *Период глазкового пересечения* вычисляется как среднее значение горизонтальной гистограммы для каждой точки пересечения вокруг соответствующего уровня амплитуды. Эта величина измеряется в секундах. Среднее значение всей горизонтальной *PDF* вычисляется в области, которая определяется свойством *CrossingBandWith* объекта *eyemeasurementsetup*.

Этой областью является область от $-A_{total}BW$ до $+A_{total}BW$, где $-A_{total}$ – общий диапазон размаха амплитуды глазковой диаграммы (т. е., $A_{total} = A_{max} - A_{min}$) и *BW* – это пересекающаяся ширина диапазона, показанная на рис. 10.

Средняя *PDF* в этой области показана на рис. 11. Поскольку этот пример предполагает два символа на ось, то присутствуют две точки пересечения.

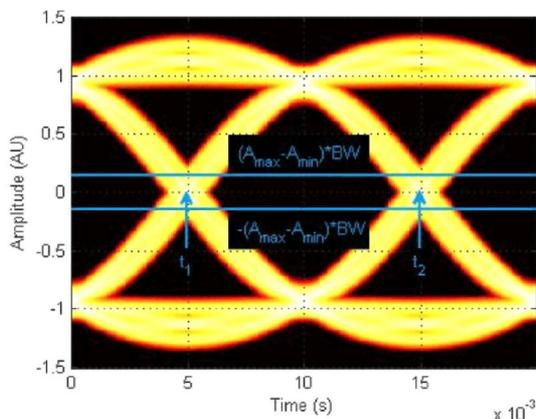


Рис. 10. Период глазкового пересечение

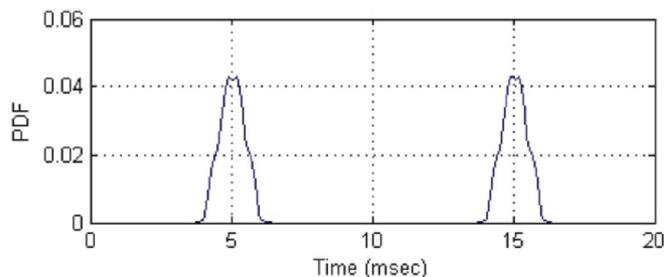


Рис. 11. Средняя функция распределения вероятностей в области, определяемой свойством *CrossingBandWith* объекта *eyemeasurementsetup*

Глазковая задержка (*EyeDelay*). Глазковая задержка (рис. 12) – это расстояние от средней точки глаза к началу времени; измеряется в секундах. Метод анализа состоит в вычислении этого расстояния с использованием времени пересечения. Для симметричного сигнала, *EyeDelay* – также лучшая точка осуществления выборки.

Время глазкового затухания (*EyeFallTime*). *Время глазкового затухания* – это среднее время между высокими и низкими пороговыми значениями, которые определяются с помощью свойства *AmplitudeThreshold* (амплитудный порог) объекта *eyemeasurementsetup*. Время затухания, вычисляемое от 10 до 90 % амплитуды глаза, показано на рис. 12.

Время глазкового нарастания (*EyeRiseTime*). *Время глазкового нарастания* – это среднее время между низкими и высокими пороговыми значениями, которые определяются с помощью свойства *AmplitudeThreshold* (амплитудный порог) объекта *eyemeasurementssetup*. На рис. 13 показано время нарастания, вычисленное от 10% до 90% амплитуды глаза.

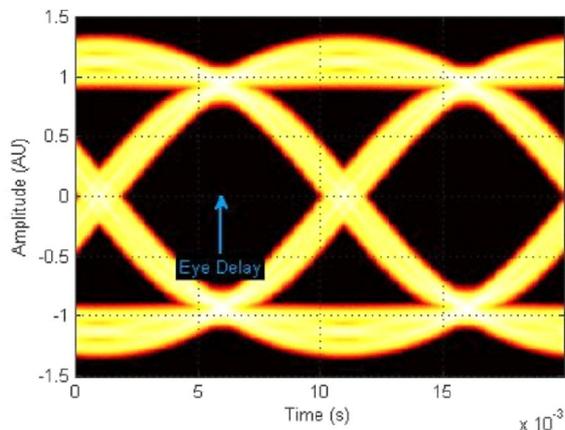


Рис. 12. Глазковая задержка

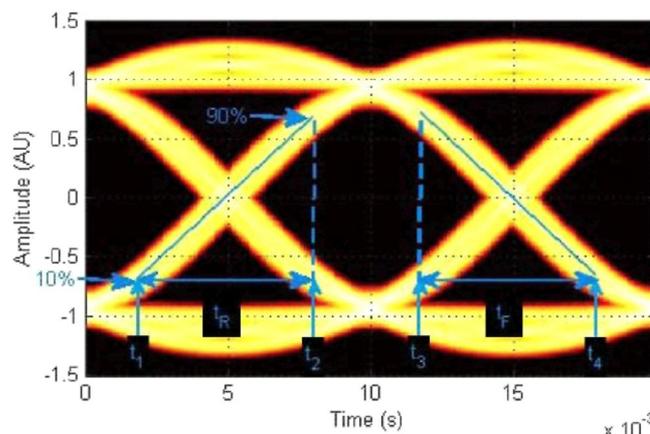


Рис. 13. Время глазкового нарастания

Глазковая ширина (*EyeWidth*). *Глазковая ширина* (рис. 14) – это горизонтальное расстояние между двумя точками, которые являются тремя стандартными девиациями (3σ) от средних значений моментов глазковых пересечений, в направлении к центру глаза. Размерность *глазковой ширины* – секунда.

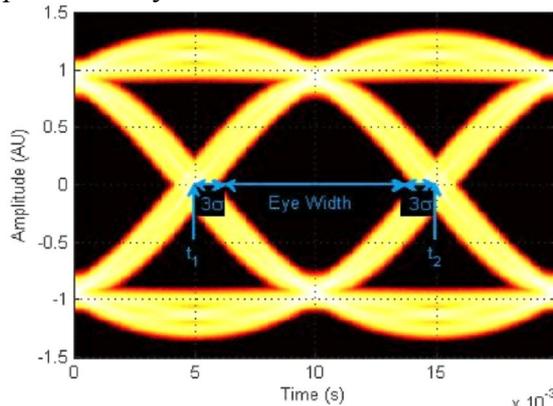


Рис. 14. Глазковая ширина

Горизонтальное глазковое открытие (*EyeOpeningHor*). *Горизонтальное глазковое открытие* – это горизонтальное расстояние между двумя точками горизонтальной гистограммы, соответствующими значению интенсивности ошибочных битов, которая определяется свойством *BERThreshold* (*ПорогBER*) объекта *eyemeasurementssetup*. Измерение производится по значению амплитуды, определенной свойством *ReferenceAmplitude* объекта *eyemeasurementssetup*. Оно вычисляется с учетом случайных и детерминистических компонентов с использованием *dual-Dirac* модели [4].

Типичное значение *интенсивности ошибочных битов* для измерений глазкового открытия – 10^{-12} , что приблизительно соответствует 7σ точкам с учетом гауссовского распределения.

Джиттер полного размаха (*JitterP2P*). *Джиттер полного размаха* – это разница между пиковыми точками данных гистограммы.

Случайный джиттер (*RandomJitter*). *Случайный джиттер* – это гауссовский неограниченный компонент джиттера. Метод анализа состоит в его вычислении с использованием остаточной стандартной девиации, которая определяется по методу *dual-Dirac* следующим образом [4]:

$$RJ = (Q_L + Q_R) + \sigma,$$

где

$$Q_L = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{2BER}{\rho_L} \right);$$

$$Q_R = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{2BER}{\rho_R} \right);$$

BER – коэффициент интенсивности ошибочных битов, при котором вычисляется случайный джиттер. Он определяется свойством $BERThreshold$ объекта $eyemeasurmentsetup$.

Среднеквадратический джиттер ($Jitter_{RMS}$). *Среднеквадратический джиттер* – это стандартная девиация джиттера, которая вычисляется из горизонтальной гистограммы.

Полный джиттер ($TotalJitter$). *Полный джиттер* – это сумма случайного джиттера и детерминичного джиттера [4].

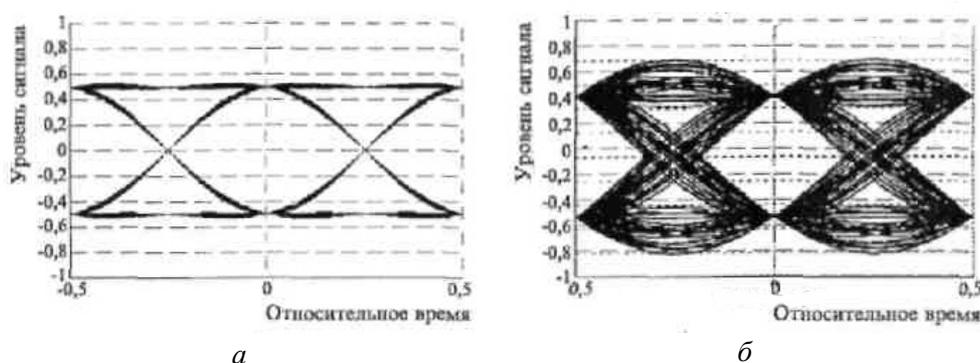


Рис. 15. Анализируемые глазковые диаграммы

Анализ двух глазковых диаграмм. Проведем анализ глазковых диаграмм, изображенных на рис. 15 (а, б). Эти две глазковые диаграммы несут в себе одинаковые полезные сигналы, так как глазковая амплитуда, амплитуда глазкового пересечения, глазковый уровень, период глазкового пересечения, глазковая задержка, время глазкового затухания, время глазкового нарастания и глазковая ширина имеют одинаковые значения. Однако заметны большие отличия между этими двумя глазковыми диаграммами. Сильно различаются следующие их параметры: процентное соотношение глазкового пересечения, глазковая высота, глазковое отношение сигнал/шум, добротность, вертикальное глазковое открытие, детерминистический джиттер, горизонтальное глазковое открытие, джиттер полного размаха, случайный джиттер, среднеквадратический джиттер и полный джиттер. Это свидетельствует о том, что глазковая диаграмма на рис. 15, б имеет значительно больший коэффициент интенсивности ошибочных битов BER , чем глазковая диаграмма на рис. 15, а. Соответственно сигнал на рис. 15, б сильно зашумлен, в то время, как у сигнала на рис. 15, а шумы отсутствуют.

Вычислив вышеприведенные параметры, можно с точностью увидеть полезный сигнал, определить коэффициент интенсивности ошибочных битов и принять решение, как улучшить цифровой сигнал в определенной телекоммуникационной сети. А после выполнения всех необходимых этапов по улучшению формы сигнала наглядно увидеть результаты изменений.

Выводы. Проведен анализ возможности применения глазковых диаграмм для исследования цифровых сигналов, описаны параметры сигналов. Проведенные исследования показали, что глазковые диаграммы являются одним из наиболее перспективных способов измерения параметров цифровых сигналов, позволяющих в простой и доступной форме

оперативно измерить все необходимые компоненты радиочастотного тракта, применяя различные методы представления цифрового сигнала.

Список литературы

1. Бакланов И. Г. Методы измерений в системах связи. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1999. – 195 с.
2. Бурдин А. В. Методы и средства измерений в телекоммуникационных системах: Курс лекций. – <http://lsits.psati.ru/lectures/msits.html>
3. Красносельский И. Н. Анализ глазковых диаграмм и выбор формы импульсов для цифровой передачи сигналов // Электросвязь, 1997, №6.
4. Eye diagram analysis. – The MathWorks, Inc. – http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/comm/index.html?/access/helpdesk/help/toolbox/comm/ref/commscope.eyedia_gram.html&http://www.google.com/search?sourceid=navclient&ie=UTF-8&rlz=1T4GGLL_enUS302US302&q=matlab+eye+diagram
5. Eye Diagram Analyzer. – Yellow Fourier Technologies. – <http://yellowfourier.com/eyedia.html>

О. П. Ткаліч, О. О. Дятлов, Р. А. Мамаєв, Д. Ю. Нечай

Застосування глазкових діаграм для дослідження цифрових сигналів

Розглянуто один з найперспективніших методів аналізу сигналів – метод глазкових діаграм. Детально описано основні параметри цифрових сигналів, які можуть відобразити їх кількісні показники і які можна виміряти за допомогою цього методу, а також виконано аналіз сигналів на прикладі двох глазкових діаграм.

O. P. Tkach, A. A. Diatlov, R. A. Mamaev, D. Y. Nechay

Apply eye patterns for research of digital signals

In this article is observed one of the most perspective methods of the analysis of digital signals – the eye pattern method. Detail described main parameters of digital signals which can reflect their quantitative indices and which are possible to measure by means of the given method and also led the analysis on the example of two eye patterns.