

Jitter-Messung mit Hilfe der Frequenzanalyse

Vorhersage der Bitfehlerrate eines Systems

B.01

Die Schaltungen von heute werden durch immer engere Timing-Grenzwerte und höhere Taktgeschwindigkeiten bestimmt, wodurch Jitter zu einer kritischen Ursache von Systemfehlern wird. Die Identifizierung und Messung von Jitter-Komponenten hilft bei der Fehlersuche in Hochgeschwindigkeitsschaltkreisen und ist für mehrere serielle Hochgeschwindigkeits-Datenübertragungsstandards wie beispielsweise ‚Fiber Channel‘, ‚SONET‘, ‚SDH‘ und Giga-bit Ethernet erforderlich. In diesem Artikel wird ein neues Verfahren zur Analyse und Messung von Jitter-Bestandteilen mit Hilfe der Spektralanalyse vorgestellt. Damit verkürzt sich die Ermittlung der Bitfehlerrate (BER) auf Grundlage des Ergebnisses der Jitter-Analyse auf wenige Sekunden, im Gegensatz zu Minuten oder sogar Stunden, die bei konventionellen BER-Analysegeräten benötigt werden.

Bevor wir mit der Erläuterung des neuen Messverfahrens beginnen, gilt es die Frage zu klären, was ist Jitter eigentlich? Jitter bezeichnet die Abweichung der relevanten Flanken von ihrer idealen Position in einer Folge von Datenbits. Wie in Abbildung 1 dargestellt, ist Jitter (e_i) die Differenz zwischen dem Zeitpunkt (t_i'), an dem das Ereignis erwartet wird, und dem Zeitpunkt (t_i), an dem es tatsächlich auftritt. Bei einer digitalen Datenübertragungsverbindung bezeichnet Jitter den Offset zwischen der erwarteten und der tatsächlichen Position des Signalübergangs.

Jitter präzise messen

Bei der seriellen Datenübertragung kann Jitter ein zentrales Problem darstellen, da der Da-

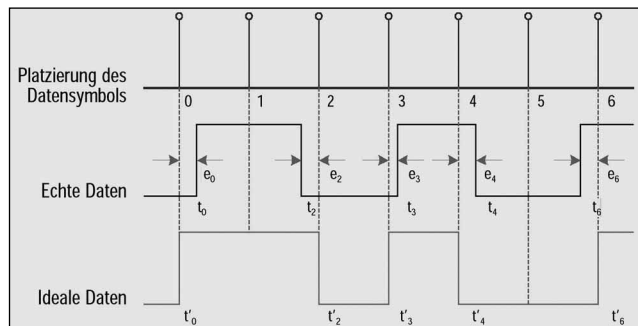


Abb. 1: Definition von Jitter

tentakt in der Regel nicht zusammen mit den Daten übertragen wird. Aus diesem Grund führt übermäßiger Jitter auf dem Datensignal des Senders zu Fehlern bei der Datenrückgewinnung auf der Empfängerseite. Zur Vermeidung zu hoher Fehlerraten schreiben die Normen Jitter-Grenzwerte vor, um die Sender- und Empfängerschaltkreise so zu konzipieren, dass sie innerhalb der zulässigen Jitter-Toleranzen arbeiten. Um sicherzustellen, dass diese Vorgaben von den Geräten eingehalten werden, muss man Jitter präzise messen.

Man unterscheidet zwischen zwei allgemeinen Jitter-Kategorien: Deterministischem Jitter (Dj) und zufälligem Jitter (Rj), Random Jitter). Bei den Verfahren zur seriellen Datenübertragung kumulieren diese beiden Jitter-Arten auf unterschiedliche Art und Weise. Rj wird als ungebundene Komponente betrachtet, die üblicherweise in einer Normalverteilung auftritt und somit bestimmten statistischen Regeln unterliegt. Dj dagegen

erscheint gebunden und setzt sich aus ‚ISI‘ (inter symbol interference), ‚DCD‘ (duty cycle distortion) und ‚Pj‘ (periodischer Jitter) zusammen. Dj ist vorhersehbar, einheitlich und hat konkrete Ursachen. Der deterministische Jitter weist eine Nicht-Gaußsche-Amplitudenverteilung auf, die immer gebunden ist. Dj ist durch seinen gebundenen Spitze-zu-Spitze-Wert gekennzeichnet.

ISI steht für Intersymbolstörung. Dabei handelt es sich um datenabhängigen deterministischen Jitter, der üblicherweise durch Kanaldispersion oder Filterung verursacht wird. Er tritt dann auf, wenn das Signal zu unterschiedlichen Zeiten an der Empfängerschwelle ankommt, wenn es in Bitfolgen (Symbolen) von unterschiedlichen Stellen aus beginnt. In diesem Fall spricht man auch von datenabhängigem Jitter (DDj , data depending jitter). ‚DCD‘ bezeichnet die Tastverhältnisverzerrung. Hierbei handelt es sich um die Differenz zwischen der mittleren Impulsbreite des posi-

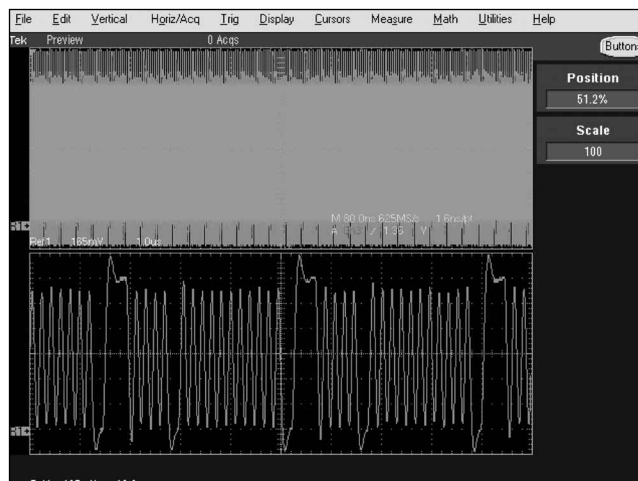


Abb. 2: Datensignal mit periodisch sich wiederholendem Muster

Autor

HANS-PETER FLEISCHHEUER
Tektronix GmbH;
Stollberger Straße 200, D-50933 Köln
Fon: 0221/9477-400, Fax: 0221/9477-200
E-Mail:
hans-peter.fleischheuer@tektronix.com

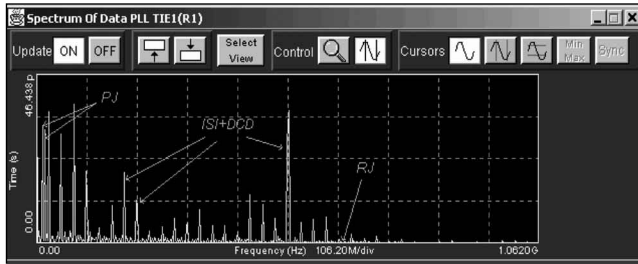


Abb. 3: Gesamt-Jitter-Spektrum

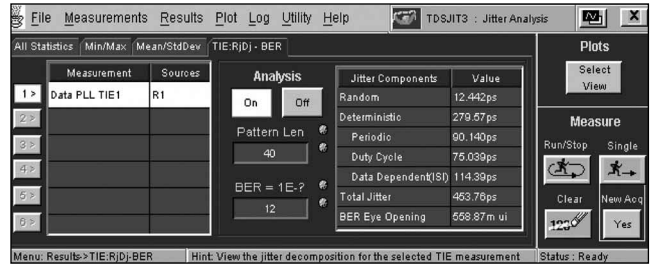


Abb. 4: Messung der Jitter-Bestandteile

tiven Impulses und der mittleren Impulsbreite des negativen Impulses in einer taktähnlichen Bitfolge. Diese Differenz kann durch Amplituden-Offsetfehler, Einschaltverzögerungen und Sättigung verursacht werden.

Pj wiederholt sich zyklisch mit einer nicht mit den Daten korrelierten Periode. Eine typische Ursache für Pj sind Störsignale von Schaltnetzteilen. Pj lässt sich modellhaft durch ein oder mehrere Sinussignale und deren Oberwellen darstellen.

„Rj“ ist die Abkürzung für zufälligen Jitter. Rj weist eine Normalverteilung auf, deren Amplitude theoretisch ungebunden ist. Die Normalverteilung wird durch ihren Effektivwert (eff) oder ihre Standardabweichung gekennzeichnet. Es lässt sich leicht zeigen, dass jede Gaußsche Zufallsvariable den Bereich des 14-fachen ihrer Standardabweichung im Durchschnitt nur einmal in 10^{12} überschreitet.

Wird durch Überschreitung dieser Spanne eine Bitfehlerrate im Datenübertragungssystem verursacht, dann entspricht dies einer Bitfehlerrate (BER) von 10^{-12} . „Tj“ (total jitter) ist die Bezeichnung für Gesamt-Jitter. Er setzt sich aus Dj und Rj zusammen. Bei einer BER von 10^{-12} wird deren Spitze-zu-Spitze-Wert wie folgt berechnet:

$$TJ = DJ + RJ \times 14$$

Jitter-Bestimmung mit Hilfe der Frequenzanalyse

Bei diesem Ansatz wird vorausgesetzt, dass das gemessene serielle Datensignal aus einem sich periodisch wiederholenden Muster besteht und die Länge des wiederholenden Musters bekannt ist. Das Signal in Abbildung 2 beispielsweise enthält Wiederholungen der Fiber-Channel-Leerlaufolge K28.5-D21.4-D21.5-D21.5. Die Musterlänge beträgt 40.

Mit Hilfe der Frequenzbereichsanalyse wird Jitter wie folgt gemessen: Mit einem Oszilloskop wird eine Einzelerfassung mit ausreichend hoher Samplerate (real time single shot) durchgeführt. Um Jitter möglichst präzise zu erfassen, muss die Timing-Genauigkeit, der Signal/Rausch-Abstand, die effektiven Bits und die Signaldarstellungsgüte des

Erfassungssystems so hoch wie nur möglich sein. Das Oszilloskopmodell „TDS6604“ mit „TekConnect“-Tastköpfen von Tektronix verfügt z.B. über die erforderliche hohe Signalgüte. Nach Abschluss der Signalerfassung wird der Datensatz von der Software analysiert, um den Zeitintervallfehler für jede einzelne Taktflanke zu ermitteln. Je nach Anforderung des Benutzers kann die „least square“-Methode oder das „Golden PLL“-Verfahren eingesetzt werden, um den Referenztakt wiederherzustellen und den Zeitintervallfehler zu finden. Der Zeitintervallfehler steht für den Jitter auf den erfassten Datenflanken.

Anschließend werden die Zeitintervallanalyseergebnisse einer „Fast-Fourier-Transformation“ (FFT) unterzogen, um das Spektrum des Zeitintervalls zu berechnen. Bei diesem Spektrum handelt es sich um das Jitter-Spektrum in dem erfassten Signal. Vor der Berechnung des Spektrums wird noch ein wichtiger Schritt durchgeführt, um die Genauigkeit des FFT-Ergebnisses zu gewährleisten. Bei den Punkten, an denen zwischen zwei oder mehr Symbolen keine Datenflanke vorliegt, und insbesondere bei NRZ-Daten, bei denen die Pegel über mehrere Symbolperioden gleich bleiben können, lässt sich die Symbolgruppe durch Interpolation bestimmen. Der Jitter-Wert wird an diesen Symbolstellen mit „interpoliert“ gekennzeichnet, so dass er von dem den Übergängen entsprechenden Jitter unterschieden werden kann.

Beim Spektrumsansatz ergeben sich die verschiedenen Komponenten des Gesamt-Jitters aus zwei Schritten. Im ersten Schritt werden Rj und Dj getrennt. Im zweiten Schritt werden die Dj-Anteile getrennt.

Analyse per Spektrumsansatz

Beim Spektrumsansatz wird der Gesamt-Jitter auf Basis der folgenden Beobachtungen in die beiden Kategorien Dj und Rj unterteilt:

Rj weist eine Normalverteilung auf, sein Spektrum ist breit und flach. Dj ist im Zeitbereich periodisch, da davon ausgegangen wird, dass das serielle Datensignal aus einem sich periodisch wiederholenden Datenmuster besteht; hier liegt ein Impulsspektrum vor.

Abbildung 3 veranschaulicht das Gesamt-Jitter-Spektrum des in Abbildung 2 dargestellten Datensignals. Die unterschiedlichen Eigenschaften von Dj und Rj sind offensichtlich. Zur Trennung der Impulse vom Rauschuntergrund lassen sich verschiedene Ansätze verwenden, bei denen es jedoch FFT-Schwankungen zu berücksichtigen gilt, die durch FFT-Auflösung, Leistungsverteilung über Frequenz, Auswahl des FFT-Fensters usw. entstehen. Der Standardabweichungsparameter von Rj ergibt sich aus der Berechnung des Effektivwertes des Rauschuntergrunds im Frequenzbereich.

Das reine Dj-Spektrum wird zurückgewonnen, indem man alle Bits aus dem Tj-Spektrum, die Rj zugewiesen werden können, auf Null setzt. Eine Zeitbereichsaufzeichnung von Dj erhält man mittels Durchführung einer umgekehrten FFT bei diesem Dj-Spektrum. Der für Dj interessante Parameter „Spitze-zu-Spitze-Zeitwert“ lässt sich anhand dieses Zeitbereichssignals direkt ablesen. Zu beachten ist, dass die zuvor als „interpoliert“ gekennzeichneten Stellen bei der Bestimmung des Spitze-zu-Spitze-Wertes nicht mitgezählt werden.

Analyse der Dj-Bestandteile

Nachdem im vorherigen Schritt das Spektrum von Dj ermittelt wurde, lassen sich nun die drei Dj-Komponenten ISI, DCD und Pj berechnen. Auch hier besteht Dj nur aus Signalanteilen. Die Jitter-Anteile ISI und DCD können auf Grund der folgenden Beobachtungen von dem Pj-Anteil getrennt werden:

- ▶ Alle durch ISI und DCD-Anteile hervorgerufenen Impulse müssen als Vielfache von $0,5/N$ erscheinen, wobei N die Länge des Datenmusters, also die Anzahl der Symbole in dem sich wiederholenden Muster der Datenfolge darstellt
- ▶ Alle übrigen Signalanteile werden durch Pj verursacht (siehe Abbildung 3)

Nachdem Pj auf diese Weise isoliert wurde, wird eine inverse FFT durchgeführt, um Pj im

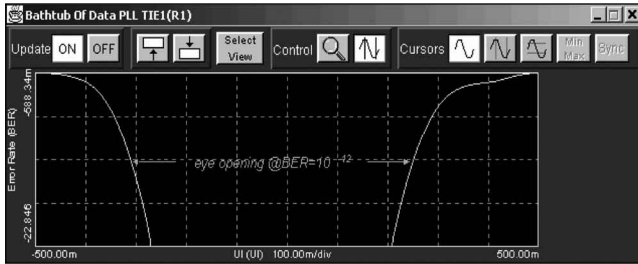


Abb. 5:
Ermittlung der Bitfehler-
rate (BER)

Bitfehlerrate (BER) ermittelt werden. Anhand der Trennung von D_j/R_j erhält man die Zeitbereichsaufzeichnung von D_j . Nun wird das Zeitbereichshistogramm von D_j berechnet, ohne die als ‚interpoliert‘ gekennzeichneten Stellen mitzuzählen. Das Zeitbereichshistogramm von R_j wird auf Grundlage seines Gaußschen Modells unter Verwendung der während der D_j/R_j -Trennung erhaltenen Standardabweichung zusammengestellt. Anschließend werden die Histogramme von D_j und R_j zusammenggeführt, um das wiederhergestellte Histogramm des Gesamt-Jitters zu erhalten. Wenn dieses wiederhergestellte T_j -Histogramm richtig skaliert wird, lässt es sich als Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion („PDF“, probability distribution function) von T_j interpretieren.

Aus dieser PDF erhält man schließlich die ‚Bathtub‘-Kurve (BER-Kurve in Abbildung 5). Zu beachten ist, dass die Bathtub-Kurve unter Verwendung einer logarithmischen Skalierung auf der senkrechten Achse gezeichnet wurde, da die relevante BER einem sehr kleinem Wert entspricht. Die Entscheidungsfehlerrate liegt stets niedriger als die angegebene Bitfehlerrate, so lange der Entscheidungszeitpunkt irgendwo innerhalb zwischen den beiden Kurven liegt. Dies entspricht der Sicherstellung, dass der Datenabtastpunkt in einem Augendiagramm eines Oszilloskops zentriert ist. Auf Basis der BER-Kurve lässt sich die Augenöffnung für eine gegebene Bitfehlerrate bestimmen.

Fazit

Im Zuge der immer höheren Taktgeschwindigkeiten und immer engeren Timing-Vorgaben wird die Timing-Beschreibung zu einem immer wichtigeren Faktor. Bei den modernen Schaltungen reicht die Beschreibung von Jitter nicht aus, man muss auch seinen Ursachen auf den Grund gehen, indem man Jitter misst und als Mittel zur Vorhersage des Systemverhaltens über bestimmte Zeiträume einsetzt. Dass dabei Messmittel zum Einsatz kommen sollten, die die Gesamtkosten des Unternehmens senken, versteht sich von selbst. Zur Jitter-Analyse mit Hilfe eines Spektrumsansatzes ist ein vielseitiges Messgerät wie das leistungsfähige Oszilloskop daher unerlässlich.

Zeitbereich wiederherzustellen. Der für P_j interessante Parameter ist der Spitze-zu-Spitze-Wert seiner Zeitbereichsaufzeichnung. Nun werden nur die ISI und DCD zurechenbaren Bestandteile des D_j -Spektrums verwendet, um eine inverse FFT zur Wiederherstellung von ISI und DCD im Zeitbereich durchzuführen. Diese Zeitbereichsaufzeichnung lässt sich nun in zwei Datensätze unterteilen, wobei einer nur die steigenden Flanken, und der andere nur die fallenden Flanken enthält. Für beide Datensätze wird ein Histogramm berechnet. Diese beiden Histogramme können eine ähnliche Form aufweisen, wenn die Anzahl der Signalfanken etwa gleich ist. Die zur Unterscheidung von DCD- und ISI-Anteilen

eingesetzte Methode beruht auf den folgenden Eigenschaften:

- ▶ Die Differenz zwischen den Mittelwerten der beiden Histogramme ist die DCD
- ▶ Der Mittelwert der Spitze-zu-Spitze-Werte der Histogramme ist die ISI

Mit Hilfe dieses Spektrumsansatzes misst ‚TDSJIT3‘ die in Abbildung 4 dargestellten Werte des Jitter-Anteils.

Ermittlung der Bitfehlerrate

Nach der getrennten Beschreibung von deterministischem und zufälligem Jitter kann die

Beitrag als PDF im Internet:

www.duv24.net

more @ click TK4B0101

