

Wprowadzenie do LVDS (4)

W przedostatniej części kursu zajmiemy się zjawiskiem groźnym dla większości systemów cyfrowych – jitterem.

Jak widać na **rysunku 1**, jitter składa się z części deterministycznej i losowej. Jitter deterministyczny (DJ) pochodzi ze źródeł wewnątrz systemu – przykładem są przesłuchy, interferencje międzysymbolowe i zakłócenia z zasilacza. Jitter jest ograniczony, zatem można określić jego wartość międzyszytową. Jitter losowy (RJ) pochodzi ze źródeł fizycznych – szumu termicznego, szumu śrutowego i rozpraszania w mediach optycznych. Standardowym sposobem charakteryzowania losowego jitteru jest funkcja gęstości prawdopodobieństwa, zazwyczaj Gaussa. Funkcja Gaussa ma nieskończenie długie ogony, co oznacza, że składowa losowa jitteru może przyjmować nieograniczone wartości.

Charakterystyka jitteru losowego

Jitter losowy jest opisywany funkcją Gaussa. Przyjmuje się, że jego wartość może być nieograniczona. Miarę tego rodzaju jitteru jest wartość średnia i odchylenie standardowe. Ponieważ jitter losowy można modelować funkcją Gaussa, za jej pomocą można też przewidzieć wartość międzyszytową jitteru jako funkcję błędu (BER).

Typowe źródła jitteru losowego to szum śrutowy, szum migotania i szum termiczny. Szum śrutowy to szum szerokopasmowy (biały) generowany przez elektrony i dziury przemieszczające się w półprzewodnikach. Amplituda szumu śrutowego jest funkcją średniej wartości prądu. Szum migotania ma charakterystykę widmową proporcjonalną do $1/f$. Jego źródłem jest efekt powierzchniowy polegający na wahaniami zagęszczenia nośników na skutek losowego przyciągania i uwalniania elektronów z pułapek na utlenionych powierzchniach. Szum termiczny to szerokopasmowy szum biały (o stałej

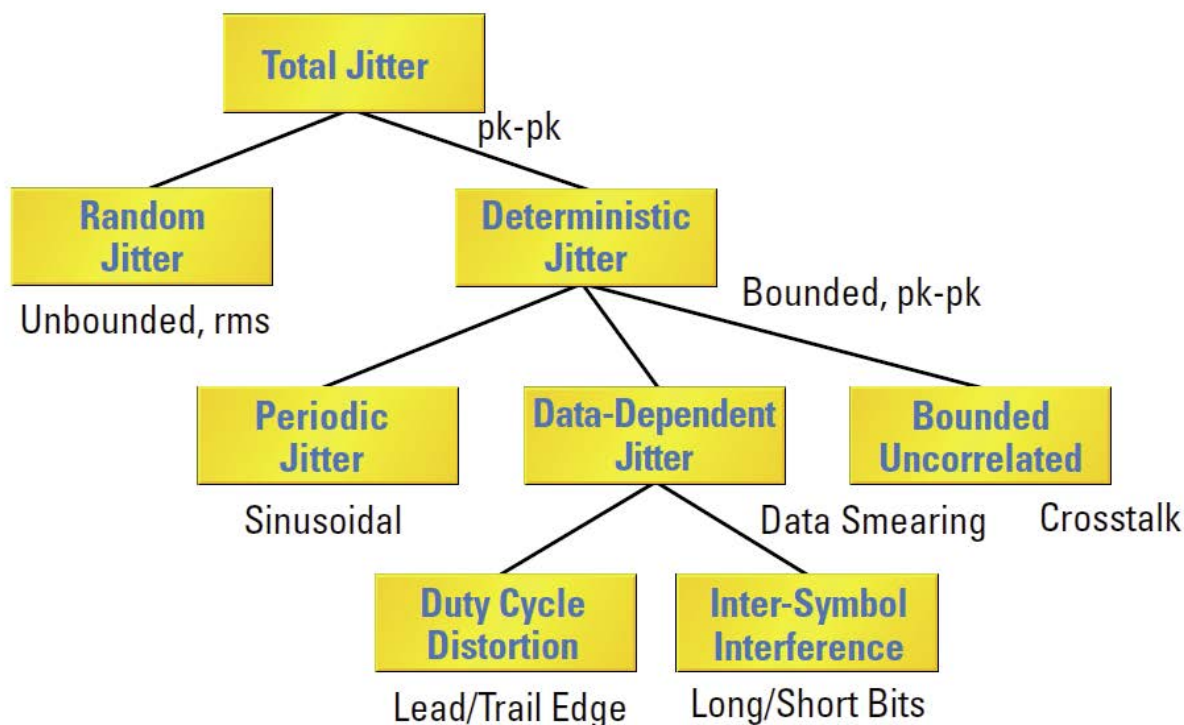
amplitudzie widmowej). Jest generowany na skutek przenoszenia energii między wolnymi elektronami a jonami w przewodniku.

Jitter deterministyczny

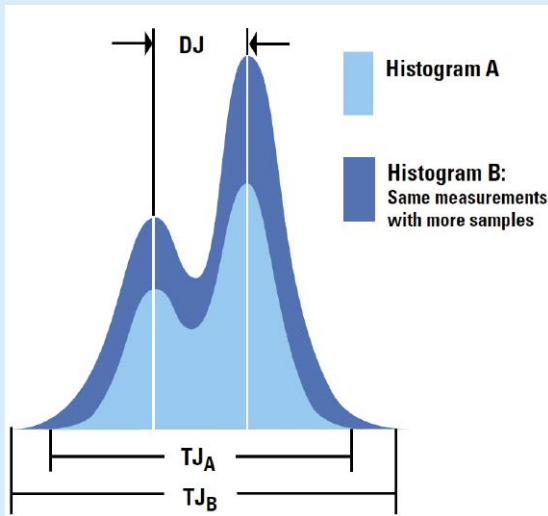
Ten rodzaj jitteru jest bardziej złożony. Zaliczają się do niego takie zjawiska, jak zniekształcenie współczynnika wypełnienia (*duty cycle distortion* – DCD). Jest to wynik jakiegokolwiek różnicy w czasie trwania stanów logicznych w zmiennej sekwencji bitów (na przykład 0101). Pojawia się ona na skutek różnicy czasów narastania i opadania bądź wahań progów przełączania układu.

DCD i interferencje międzysymbolowe (ISI) są funkcjami historii danych i występują, gdy następuje przejście między stanami logicznymi. Przyczyna tego zjawiska jest różnica czasu potrzebna, aby sygnał pojawiający się na odbiorniku osiągnął odpowiedni próg, zaczynając od różnych napięć początkowych spowodowanych długimi ciągami bitów (symboli). ISI występuje również, gdy medium transmisyjne propaguje różne składowe częstotliwości danych (symboli) z różną szybkością, na przykład, gdy jitter zmienia się jako funkcja gęstości zbocz (rysunek 2).

Histogram sumarycznego jitteru (TJ) przedstawia funkcję gęstości prawdopodobieństwa. Jeśli zatem jitter deterministyczny i losowy są niezależnymi procesami, funkcję gęstości prawdopodobieństwa sumarycznego jitteru można otrzymać jako splot funkcji jitteru deterministycznego i losowego. Usunięcie jitteru deterministycznego z histogramu pozostawiłoby rozkład Gaussa. Dodanie jitteru deterministycznego poszerza wykres, zachowując przy tym ogony funkcji Gaussa. Widoczne są wartości średnie rozkładu po prawej i lewej stronie. Różnica między dwoma wartościami średnimi to jitter



Rysunek 1. Składowe jitteru



Rysunek 2. Histogram sumaryczny rozkładu jitteru

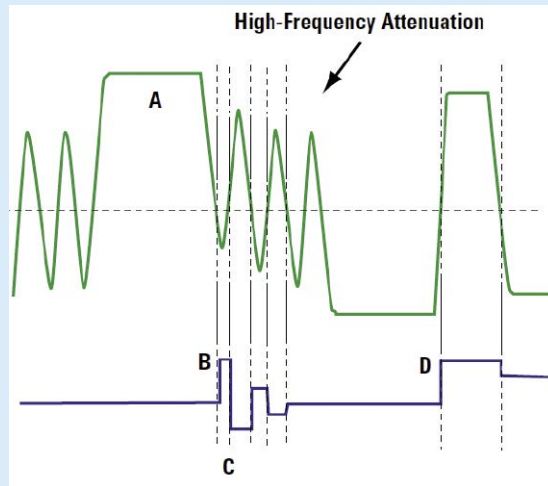
deterministyczny, a ogony przedstawiają jitter losowy. Ponieważ jitter deterministyczny jest ograniczony, jego wartość nie zmienia się wraz z pomiarem kolejnych próbek. Składowa losowa jitteru nadal się zwiększa wraz ze wzrostem liczby próbek, ponieważ wartość jitteru losowego nie jest ograniczona.

Zniekształcenie współczynnika wypełnienia

Istnieją dwie główne przyczyny jitteru polegającego na zniekształceniu współczynnika wypełnienia (*duty cycle distortion* – DCD). Jeśli dane docierające do nadajnika są teoretycznie doskonałe, ale próg przełączania nadajnika odbiega od idealnego poziomu, wówczas sygnał na wyjściu nadajnika będzie miał współczynnik wypełnienia zniekształcony zależnie od czaru narastania (*slew rate*) zboczy sygnału danych.

Przebieg oznaczony kropkowaną linią na **rysunku 3** pokazuje idealny sygnał na wyjściu nadajnika z progiem ustawionym na 50% i współczynnikiem wypełnienia również 50%. Linia ciągła to przebieg na wyjściu nadajnika zniekształcony z powodu dodatniego przesunięcia progu. Dodatnie przesunięcie poziomu progu oznacza, że otrzymany przebieg na wyjściu nadajnika będzie miał współczynniki wypełnienia mniejszy od 50%. Jeśli poziom progu obniży się, wówczas współczynnik wypełnienia sygnału na wyjściu odbiornika będzie większy.

Pomiar równoważnego odcinka czasu (TIE) związanego z wygenerowanym komputerowo wynikiem najlepszego dopasowanego sygnału zegarowego pozwala określić błąd czasu na każdym bicie: dodatni w przypadku narastającego zbocza i ujemny w przypadku zbocza opadającego. Uzyskany przebieg TIE będzie miał taką samą



Rysunek 4. Przykład powstawania jitteru na skutek interferencji międzysymbolowych i odbić

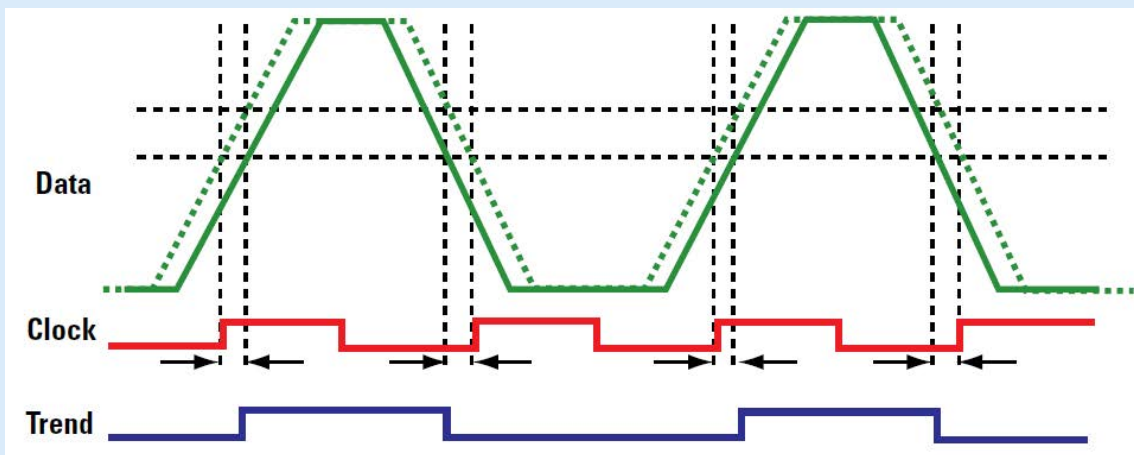
częstotliwość podstawową, jak połowa częstotliwości strumienia danych. Natomiast faza przebiegu TIE zmienia się w zależności od tego, czy przesunięcie progu jest dodatnie, czy ujemne.

Jeśli w systemie nie ma innych źródeł jitteru, wartość międzyszczytowa jitteru DCD teoretycznie powinna być stała dla całego czasu trwania sygnału. Jednak w praktyce występują inne źródła jitteru, jak interferencje międzysymbolowe, które niemal zawsze utrudniają izolację składowej DCD. Jedną z metod pomiaru DCD jest pobudzenie systemu lub układów powtarzalną sekwencją 0-1-0-1.... Ta technika pozwala wyeliminować jitter interferencji międzysymbolowych i obserwować DCD w symulowanym przebiegu i na analizatorze widma znacznie łatwiej. Wyświetlenie widma jitteru pozwala zobaczyć składową DCD jako dodatkową częstotliwość równą połowie częstotliwości danych.

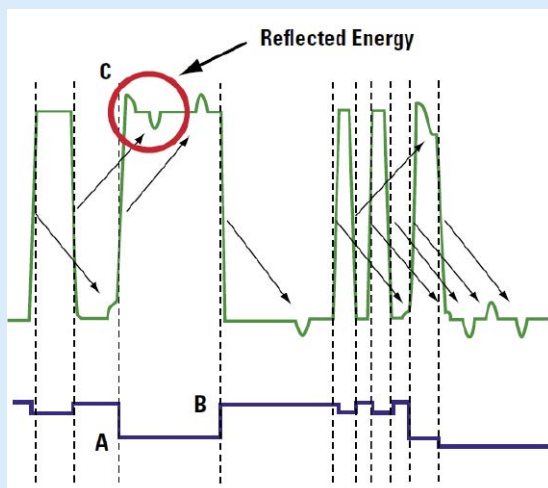
Inną przyczyną wystąpienia DCD jest asymetria czasów narastania i opadania sygnału. Dłuższy czas opadania zbocza w stosunku do czasu narastania sprawia, że współczynnik wypełnienia dla powtarzalnego ciągu 1-0-1-0... staje się większy od 50%. Analogicznie, dłuższy czas narastania w stosunku do czasu opadania daje współczynnik wypełnienia mniejszy od 50%.

Interferencje międzysymbolowe

Interferencje międzysymbolowe (ISI) są rodzajem jitteru zależnego od danych (*data-dependent jitter* - DDJ). Występują, gdy pasmo medium transmisyjnego lub elementów systemu jest mniejsze od pasma przesyłanego sygnału. W dziedzinie czasu widać, jak pasmo kanału transmisji spowalnia czasy narastania / opadania zboczy sygnału. W przypadku sygnału okresowego, takiego jak zegar, spowolnienie zboczy może zaokrąglić zbocza



Rysunek 3. Jitter polegający na zmianie współczynnika wypełnienia powoduje przesunięcie punktów czasowych.



Rysunek 5. Przykład deterministycznego jitteru w postaci interferencji międzysymbolowych – odbicia zależnych od przebiegu sygnału

sygnału i potencjalnie sflumić sygnał. W przypadku danych wolniejsze zbocza mogą zaburzyć czasu zmiany poziomu między 0 a 1.

Przykładowy przebieg został pokazany na **rysunku 4**. Sekwencja „1010” przed chwilą „A” ma jednakową szerokość bitów i czasy przełączania. Seria następujących po sobie „1” w chwili „A” ładuje medium transmisyjne wysokim napięciem, co powoduje dłuższy czas opadania do stanu „0” w chwili „B”. Po tym opóźnionym przejściu do zera następuje wczesne przejście do stanu „1” w punkcie „C”, ponieważ sygnał nie zdążył jeszcze osiągnąć stabilnego stanu niskiego.

Jitter powodowany przez interferencje międzysymbolowe zależy od transmitowanego ciągu. Dłuższe ciągi zer lub jedynek będą powodowały wyższy jitter w przypadku ograniczenia pasma medium transmisyjnego. Przykładowo, w przypadku ograniczonego pasma ciągi pseudolosowe o długości serii 23 bitów będą powodować większy jitter deterministyczny ISI niż ciąg o długości serii 7 bitów czy kodowanie 8b/10b (długość serii 5 bitów).

Następny symbol „0” jest poprzedzony długą serią „1”, zatem amplituda tego symbolu o ujemnej wartości zostanie zmniejszona z dwóch powodów. Po pierwsze przejście sygnału do prawidłowej ujemnej wartości potrwa dłużej, ponieważ przejście rozpoczyna się z punktu o wyższym poziomie napięcia. Po drugie, następujący bit „1” wymusza odwrócenie kierunku zmiany sygnału, zanim ten w ogóle osiągnie stabilny poziom stanu niskiego. Powstałe w ten sposób obniżenie amplitudy powoduje ujemny błąd czasu przy kolejnym przejściu do stanu „1”, ponieważ sygnał musi pokonać bardzo małą różnicę, aby osiągnąć poziom progów. Widać to w punkcie „C” wykresu przedstawiającego jitter.

Dodatni błąd czasu występuje w punkcie „D”. Przyczyna jego powstania jest taka sama, jak dodatni błąd czasu w punkcie „B” omówiony wcześniej. Długi ciąg symboli „0” pozwala sygnałowi osiągnąć stabilny stan niski. W momencie powrotnego przejścia do stanu wysokiego ponownie czas przejścia się wydłuży, co prowadzi do dodatniego błędu czasu.

Odbicia od nieciągłości impedancji ścieżki transmisji, które powoduje nieprawidłowa terminacja, również mogą prowadzić do interferencji międzysymbolowych. Nieciągłości impedancji nie tylko zawężają pasmo, ale są przyczyną odbić, które mogą zmienić przebiegi czasowe w sytuacji, gdy odbity sygnał dociera do odbiornika w pobliżu lub podczas zmiany stanu. Strzałki na **rysunku 5** pokazują, że odbicia wywołane zmianą stanu mogą objawić się w strumieniu szybkiej transmisji dopiero kilka bitów później. Jeśli odbicie dociera do nadajnika lub odbiornika podczas zmiany stanu (punkt „C”), daje się zaobserwować na wykresie oczkowym jako deterministyczny jitter związany z danymi.

Jitter powodowany przez odbicia można obniżyć, zmniejszając nieciągłości impedancji i stosując

odpowiednią terminację umieszczoną jak najbliżej końców linii transmisyjnej. Jitter powstały na skutek wąskiego pasma można zmniejszyć, wykorzystując medium transmisyjne o szerszym paśmie, a także wykorzystując układy realizujące preemfazę po stronie nadajnika i korekcję częstotliwości po stronie odbiornika.

Inną częstą przyczyną interferencji międzysymbolowych są odbicia na skutek wahań impedancji lub nieprawidłowej terminacji. Odbicia zaburzają amplitudę sygnału, co widać po prawej stronie rysunku 29. W zależności od odległości między zaburzeniami impedancji, odbicia jednego impulsu mogą w transmisji wysokiej szybkości pojawić się dopiero kilka bitów później.

Jitter okresowy

Jitter okresowy (*periodic jitter* – PJ), zwany też jitterem sinusoidalnym, powtarza się z określoną częstotliwością. PJ jest definiowany dla okresu między maksimami sygnału jako wielkość o określonej częstotliwości i amplitudzie. Ten rodzaj jitteru powstaje na skutek powtarzalnych efektów niezwiązanych ze strumieniem danych. Główne przyczyny to przesłuchczy oraz zakłócenia zasilacza impulsowego.

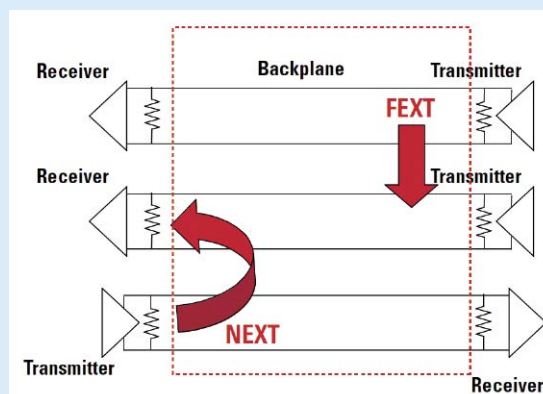
Szczególnym rodzajem PJ jest zegar o rozproszonym paśmie (SSC), wykorzystywany w wielu interfejsach komputerowych, takich jak PCI Express i SATA w celu zmniejszenia interferencji elektromagnetycznych. Przyjmuje on postać modulacji częstotliwości (FM) zegara danych. Skutkiem takiego zabiegu jest rozproszenie emitowanej energii w szerokim paśmie częstotliwości i obniżenie amplitudy poszczególnych składowych. SSC zmniejsza też prawdopodobieństwo interferencji urządzenia z innymi przyrządami.

Inne źródła jitteru

Media służące do transmisji danych i zegara zazwyczaj mają największy udział w powstawaniu jitteru w połączeniu. Jednak wpływ innych źródeł jitteru można zmniejszyć dzięki starannemu projektowaniu. Do tej kategorii można zaliczyć jitter deterministyczny, w tym jitter zależny od danych (DDJ) pojawiający się na pojemności wejściowej, jitter okresowy (PJ) z powodu przesłuchów między sąsiednimi kanałami, a także DDJ związany z zależnością między sekwencjami. Aby zademonstrować różnice zależności między rodzajami jitteru, zostaną wykorzystane wykresy oczkowe.

Wpływ pojemności wejściowej

Pojemność wejściowa jest kolejnym źródłem interferencji międzysymbolowych, podobnym do pojemności przetłoki lub złącza. Pojemność może wpływać na łącza pojedynczy i sieci multipoint, stanowiąc filtr dolnoprzepustowy, który spowalnia zbocza i zwiększa jitter. Przykładowo, przy transmisji z szybkością 1,5 Gbps obciążenie 5 pF stanowiące pojemność na wejściu wnosi dodatkowy jitter, jeśli urządzenie jest wysterowane nadajnikiem o impedancji 50 Ω, takim jak wyjście LVDS ze standardową terminacją. Jitter wnoszony przez pojemność wejściową jest ściśle związany z typem sekwencji i szybkością transmisji.



Rysunek 6. Przykłady przesłuchów na bliskim i dalekim końcu kanału

Aby uzyskać zerowy jitter przy przejściu przez bufor, ten bufor musi realizować pewną korekcję częstotliwości, aby zrównoważyć jitter wnoszony przez pojemność wejściową. Utrzymywanie tak małej pojemności, jak to tylko możliwe, prowadzi do zmniejszenia jitteru i stopnia degradacji oczka.

Przesłuchy na dalekim końcu (*Far-End Crosstalk* – FEXT) i bliskim końcu (*Near End Crosstalk* – NEXT) stanowią część jitteru okresowego, który może pogorszyć parametry systemu pod wpływem sąsiadujących kanałów lub linii zegara. Kanał agresora może pogorszyć stosunek sygnału do szumu kanału ofiary, zwiększając poziom jitteru deterministycznego w kanale ofiary. Istnieją dwa typy przesłuchów: FEXT, gdy szum przesłuchów pojawia się w kanale ofiary na dalekim końcu i jest mierzony przy odbiorniku, oraz NEXT – gdy szum przesłuchów (zazwyczaj z sąsiedniego nadajnika) pojawia się поблизу odbiornika i także jest mierzony przy odbiorniku. **Rysunek 6** przedstawia sytuację NEXT, w której nadajnik powoduje przesłuchy w kanale odbiornika oraz FEXT, gdzie sąsiedni nadajnik powoduje przesłuchy na początku kanału, przy czym są one tłumione podczas propagacji w kanale.

Systemy podatne na przesłuchy

Przesłuchy stają się istotnym problemem wraz z zagęszczeniem elementów na płycie, zmniejszaniem rozmiarów układów i zwiększaniem częstotliwości sygnałów przesyłanych w kanałach. Zazwyczaj na niskich częstotliwościach straty kanału są względnie niskie, zatem stosunek sygnału do szumu (SNR) na odbiorniku jest wysoki. Wraz ze wzrostem częstotliwości rośnie poziom przesłuchów, natomiast straty kanału związane z małą szerokością ścieżek, przelotkami, złączami i innymi niedoskonałościami rosną. W wyniku tego SNR maleje, zwiększając jitter i zamykając oczko po stronie odbiornika.

Podczas kondycjonowania sygnału w przypadku, gdy występują istotne przesłuchy na bliskim końcu, warto rozważyć wykorzystanie preemfazy po stronie nadajnika zamiast korekcji częstotliwości w celu uzyskania wyższego SNR na odbiorniku. Korekcja częstotliwości wzmocni wysokie składowe odbieranego sygnału bez względu na to, czy jest to sygnał użyteczny, czy przesłuchy. Z drugiej strony, dodanie preemfazy do sygnału może zwiększyć poziom przesłuchów NEXT, które są niekorzystne dla kanału. Dobry projekt płytki pozwala zmniejszyć poziom zarówno NEXT, jak i FEXT.

Stopa błędów

Systemy komunikacji często muszą gwarantować bardzo niską stopę błędów (*Bit Error Rate* – BER), na przykład poniżej jednego błędnie na każde 10^{12} lub 10^{15} bitów. Całkowity Jitter przekłada się na częstość występowania błędów. Ponieważ całkowity jitter zawiera jitter losowy, powszechnie przyjętą metodą zagwarantowania odpowiedniej stopy błędów jest przesłanie dużych ilości danych pseudolosowych i sprawdzenie każdego bitu. Technika ta nosi nazwę BERT (*bit-error-rate testing*). Dla niskiej wymaganej stopy błędów technika ta jest czasochłonna i przez to niepraktyczna. Zamiast niej często stosuje się takie techniki, jak wykresy oczkowe, maski oczek i krzywe wannowe, które pozwalają oszacować odpowiedni poziom integralności sygnału i ekstrapolować wyniki na stopę błędów.

Zależności sekwencji i wykresy oczkowe

Wykresy oczkowe są bardzo dobrym sposobem ilustracji jitteru i innych parametrów obserwowanych na odbiorniku. Pozwalają na pomiary ilościowe parametrów odbiornika i nadajnika lub określenie takich charakterystyk, jak czasy narastania/opadania, przestrzały, dzwonienie, straty i jitter momentu przejścia przez zero. Przykładowo, przesłanie różnych sekwencji danych z rosnącą długością ciągu identycznych symboli przez medium FR4 skutkuje wzrostem poziomu interferencji międzysymbolowych w postaci jitteru deterministycznego powodowanego efektem naskórkowym i stratami w medium.

Maski oka używane z wykresami oczkowymi są kolejnym użytecznym narzędziem, stosowanym w wielu standardach do sprawdzenia zgodności sygnału z wymaganiami. Maski oka jest oknem określającym napięcie i czas, które po umieszczeniu na wykresie oczkowym pokazuje, czy system zachowuje wystarczający margines napięcia i czasu. Standardy takie, jak InfiniBand, PCIe, SAS, 802.3 określają wymagane maski oka dla nadajników i odbiorników, zarówno optycznych, jak i elektrycznych.

Krzywe wannowe i kontury oczka

Innym sposobem analizy wykresów oczkowych jest obserwacja kontury oka lub krzywej wannowej. Krzywa wannowa czasami jest określana jako skan BERT. Krzywa wannowa to graficzna reprezentacja wykresu oczkowego, która określa statystyczna zależność stopy błędów od momentu przecięcia zera na wykresie oczkowym. Bardziej szczegółowy opis krzywych wannowych można znaleźć w dokumencie "T11.2/Project 1316-DT/ Rev 2.0" (Fiber Channel-MJSQ).

Jak zostało opisane wcześniej w rozdziale poświęconym jitterowi, jitter losowy ma rozkład Gaussa, jest nieograniczony i powoduje zawężenie oczka. Krzywa wannowa opisuje statystykę stopy błędów i zamykanie oczka pod wpływem składowej losowej jitteru. Określone sekwencje również wpływają na zamykanie oczka, zatem wymagany jest odpowiednio długi czas testowania sekwencji, aby określić charakterystykę oczka dokładnie i przewidzieć najgorszy przypadek sekwencji oraz jitteru losowego.

Aby zobrazować ilość czasu potrzebną do scharakteryzowania oczka z dokładnością do 10^{-12} przy częstotliwości transmisji 250 Mbps (liczba bitów dzielona przez szybkość transmisji), wymagany czas zostanie określony dla każdego punktu krzywej wannowej. Czas wystąpienia błędu = 10^{12} bitów/250 Mbps = 40000 sekund. Zatem do wyznaczenia krzywej wannowej większość inżynierów scharakteryzuje oczko z dokładnością między 10^{-6} a 10^{-9} i przeprowadzi ekstrapolację do 10^{-12} .

Kontur oczka pokazuje podobne statystyki wykresu oczkowego, co krzywa wannowa, poza lepszym trójwymiarowym zobrazowaniem tego, co dzieje się z oczkiem przy zmniejszeniu stopy błędów. Może to być pomocne przy określeniu, jak duży jest margines łączny w stosunku do pożądanej stopy błędów i podczas diagnostyki błędów.

Andrzej Gawryluk, EP

REKLAMA

Fotografia Kurs dla Początkujących to magazyn dla wszystkich fotografujących – bez względu na to jak zaawansowanym sprzętem dysponują. Adresowany jest do szerokiego grona entuzjastów fotografowania, którzy chcą lepiej panować nad swoim aparatem i w pełni wykorzystać jego możliwości – początkujących, którzy chcą po prostu robić lepsze zdjęcia.

Na 200 bogato ilustrowanych stronach, nasi eksperci w bardzo przystępny sposób przybliżają najważniejsze zależności i prawa rządzące fotografią, podpowiadają jak lepiej komponować ujęcia, oraz jak radzić sobie w typowych sytuacjach by nasze rodzinne, podróźnicze czy portretowe fotografie były zawsze ostre oraz idealnie naświetlone.

Do wydania papierowego dołączona jest płyta CD, na której dostępnych jest aż 10 praktycznych wideo-lekcji obsługi aparatu.

<https://goo.gl/CNm1q9>