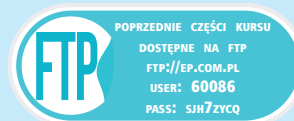


Wprowadzenie do LVDS (5)

Wybierając kable i złącza do transmisji szeregowej wysokiej szybkości, bardzo ważne jest uwzględnienie wpływu medium transmisyjnego na zachowanie systemu. Media o kontrolowanej impedancji zazwyczaj dobiera się tak, aby ich impedancja różnicowa wyniosła 100 Ω. Odpowiednie złącze o dopasowanej impedancji także jest konieczne. W tym rozdziale zostanie omówiony wpływ tych wyborów oraz sposoby kompensacji niepożądanych efektów zniekształceń w mediach.



Głównym negatywnym efektem wpływu kabla na transmisję szeregowe z dużą szybkością są straty. Straty są głównym czynnikiem ograniczającym szybkość transmisji. Straty są proporcjonalne do częstotliwości i wraz ze wzrostem szybkości transmisji kable wnoszą coraz większe straty. Fizyczne parametry konstrukcyjne kabla, które wpływają na straty to długość oraz średnica.

W tabeli 1 umieszczono listę rozmiarów kabli, związane ze średnicą kabli i ich ciężarem. Szersze kable zapewniają lepszą jakość sygnału, ale są cięższe i droższe od wąskich kabli, mogą być zatem niepraktyczne w użyciu. Aby zapewnić odpowiednią sztywność, stosuje się wielożyłowe kable miedziane do konstrukcji kabli o większej średnicy. Para przewodów różnicowych jest zazwyczaj chroniona przez osłonę. Jest ona stosowana w kablach wysokiej jakości, takich jak PCI-Express, SATA, DVI czy HDMI. Osłona stanowi lokalną ścieżkę powrotną dla sygnałów transmitowanych przez parę przewodów. Zamknięta ścieżka powrotna ma niską impedancję, co pozwala ograniczyć energię emitowaną przez parę przewodów, a tym samym zmniejszyć przesłuchy. Osłona jest zazwyczaj wykonana z folii, co jest tanim rozwiązaniem z punktu widzenia producentów. Występuje też zewnętrzna osłona otaczająca wiązkę par, która minimalizuje interferencje elektromagnetyczne. Do wykonania zewnętrznej osłony zazwyczaj używa się kabla plecionego.

Zjawisko przesłuchu jest istotne podczas wyboru rodzaju kabla. Jeśli przesłuch między parą dwóch sąsiednich kabli jest zbyt wysoki, pogorszy się współczynnik sygnału do szumu łącza.

Tanie skrętki przyjęły się powszechnie w przemyśle, ponieważ umożliwiają transmisję z większą szybkością. Kable CAT-5 oferują 4 pary przewodów każdy i są bardzo opłacalne, cena wynosi około 0,65 USD za metr. Wadą skrętek jest przesunięcie sygnału – zarówno wewnątrz pary, jak i między parami. Liczba pełnych obrotów przewodu w skrętce waha się w zależności od rodzaju i dla 100-metrowego kabla różnica długości może wynieść aż 1 metr. Co więcej, podczas produkcji poszczególnych par ich długość nie jest kontrolowana, zatem występuje przesunięcie w obrębie pary przewodów. Jest to źródłem powstawania składowej sumacyjnej podczas konwersji sygnałów różnicowych, co powoduje wzrost strat na wyższych częstotliwościach.

Kable o ograniczonym przesunięciu to PCI-Express, SATA, InfiniBand, DVI oraz HDMI. Przesunięcie staje się bardziej istotne w systemach, w których dane na wszystkich liniach powinny pojawić się na odbiorniku na tym samym bicie. Producenci kabli eksperymentują z nowymi metodami kontroli przesunięcia w obrębie pary z myślą o systemach wysokiej szybkości, takich jak PCIe 2 osiągającej przepływność 5 Gbps.

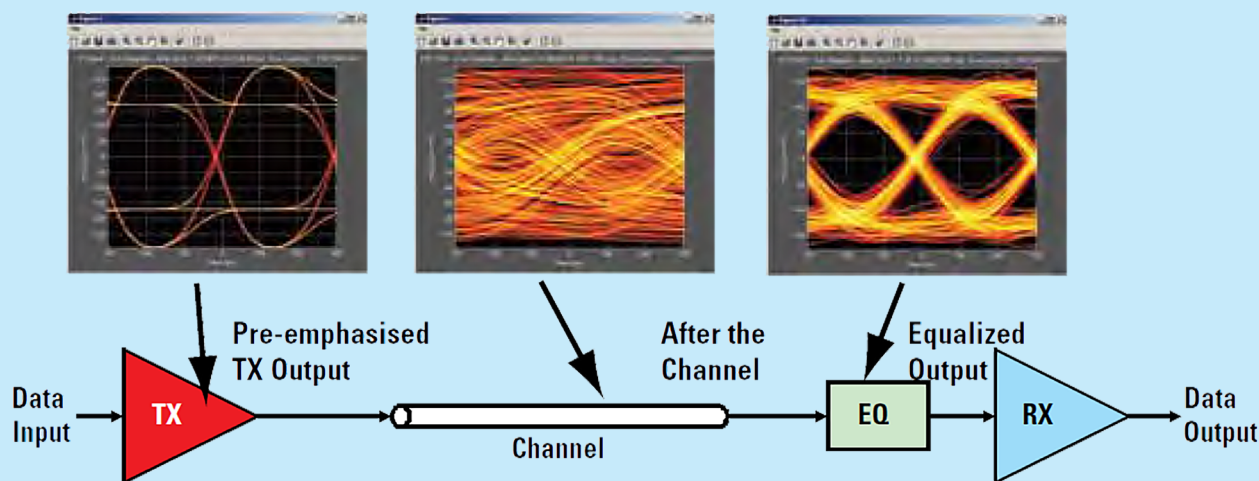
Każdy kabel zakończony jest złączem. Złącze wprowadza nieciągłości (niedopasowanie impedancji), przesłuchy i zwiększa straty. Dla dwukierunkowych łącz, takich jak SATA, izolacja par stanowi najważniejszy parametr kabla. Złącza SATA minimalizują przesłuchy i interferencje elektromagnetyczne dzięki metalowej osłonie wokół każdej pary i wokół całej wiązki. Rozwój technologii złącz wysokiej szybkości przebiegł długą drogą od plastikowych złącz RJ-45

Tabela 1. Parametry kabli i ich wpływ na straty

Średnica (skala AWG)	Stopy/Ω	Ω na 100 stóp	Średnica (mils)	Średnica (mm)
20	96,20	1,04	32,0	0,812
22	60,60	1,65	25,3	0,644
24	38,20	2,62	20,1	0,511
26	24,00	4,16	15,9	0,405
28	15,10	6,62	12,6	0,321
30	9,50	10,50	10,0	0,255
40	0,93	107,00	3,1	0,080

Tabela 2. Przykłady kabli wybranych do różnych zastosowań

Rodzaj kabla	Budowa	Przepływność (Gb/s)	Zastosowania	Średnica (AWG)	Długość (m)
Dual DVI	6×dane, 1×zegar, 3×linie kontrolne	1,65	Wideo	22, 24, 26, 28	5...30
HDMI	6×dane, 1×zegar, 3×linie kontrolne	1,65	Wideo	24, 26, 28	5...30
CAT-5e	4×dane	Do 3,125	Różne	26, 28	10
PCI-Express 2	X1, X2, X4, X8	5	PC	24, 26, 28	1...10
SATA-2	Para dwukierunkowych linii danych	3	Magazynowanie danych	24, 26	1...10



Rysunek 1. Sygnał przed i po zastosowaniu preemfazy oraz korekcji częstotliwości

kabli CAT. Ze względu na niską cenę kabli tego rodzaju producenci opracowali złącza wysokich szybkości zmniejszające przesłuchy. Przykłady kabli i ich zastosowania wymieniono w tabeli 2.

Układy kondycjonowania sygnału mogą skompensować liniowe straty wprowadzane przez kabel. Jeśli złącza wprowadzają większe straty wraz z nieciągłością impedancji, techniki korekcji częstotliwości i preemfazy nie mogą całkowicie zniwelować tych efektów. Pasma fragmentu łącza jest określane przez zakres liniowy parametru i medium.

Charakterystyka kondycjonowania sygnału

Główne źródło strat to ograniczone pasmo kabli i ścieżek PCB przewodzących sygnał między dwoma punktami. Te elementy powodują straty na skutek dwóch różnych zjawisk: efektu naskórkowego i strat w dielektryku. Straty te zależą od częstotliwości i wpływają na sygnał w różny sposób. Istnieją różne sposoby walki z oboma efektami.

1. **Efekt naskórkowy:** Straty występują, ponieważ większość prądu o wysokiej częstotliwości płynie na zewnętrznej powierzchni przewodnika. Wskutek tego efektywna rezystancja przewodnika rośnie z częstotliwością. Straty wynikające z efektu naskórkowego są proporcjonalne do pierwiastka częstotliwości sygnału, co przekłada się na stopniowy wzrost tłumienia w funkcji częstotliwości.
2. **Straty dielektryka:** Sygnał płynący w przewodniku jest izolowany przez dielektryk, zatem dielektryk absorbuje część sygnału. Straty dielektryka są wprost proporcjonalne do częstotliwości, co przekłada się na bardziej gwałtowne tłumienie w funkcji częstotliwości.

Zarówno straty dielektryka, jak i efekt naskórkowy pogarszają czasy narastania sygnałów cyfrowych wysokiej szybkości. Jest to efekt podobny do interferencji międzysymbolowych, które rozpraszają pojedynczy bit na wiele okresów sygnału, jednak ich wpływ na bity jest nieco inny. Co więcej, efekt naskórkowy jest dominującym efektem w kablach, natomiast straty dielektryka są bardziej istotne na ścieżkach PCB. Z tego powodu dla różnych mediów transmisyjnych wykorzystywane są różne techniki kompensacji.

Istnieją dwie strategie kompensacji interferencji międzysymbolowych. Pierwsza polega na użyciu lepszego medium o mniejszej stratności, natomiast druga to zastosowanie układu scalonego do kondycjonowania sygnału. Wybór medium jest zwykle ograniczony przez koszt materiałów, instalacji i konieczność ulepszenia dotychczasowych urządzeń do pracy z większą szybkością. Natomiast kondycjonowanie sygnału – preemfaza i korekcja częstotliwości – pozwalają uzyskać lepsze parametry systemu.

Te dwie ważne techniki kondycjonowania sygnału pozwalają na precyzyjne strojenie w celu

zniwelowania strat wnoszonych przez medium. Wiele układów kondycjonowania sygnału wykorzystuje obie techniki. Należą do nich układy TI DS25BR110 oraz DS16EV5110 z zaawansowanymi funkcjami kondycjonowania sygnału, które pozwalają skompensować straty w medium transmisyjnym (rysunek 1).

Techniki preemfazy (PE) i deemfazy (DE) rozwiązują problem strat poprzez tłumienie określonych częstotliwości w przesyłanych danych po stronie nadajnika. Straty w medium prowadzą do spowolnienia zboczy, co z kolei powoduje interferencje międzysymbolowe. Aby zniwelować ten efekt, sterowniki za pomocą preemfazy i deemfazy zwiększają energię zboczy (udział wysokich częstotliwości) w stosunku do płaskiego fragmentu przebiegu (o niskiej częstotliwości). Zatem łączna charakterystyka częstotliwościowa medium oraz sterownika z preemfazą/deemfazą pozostaje w miarę stała, co ostatecznie prowadzi do otwartego wykresu oczkowego po stronie odbiornika.

Różnica między preemfazą i deemfazą polega na sposobie kompensacji częstotliwości. W przypadku preemfazy energia zbocza jest zwiększana, co powoduje przestrzal na każdym zboczu. W przypadku deemfazy zbocza pozostają takie same, ale obniżona jest amplituda ustalonego poziomu sygnału. Te różnice zostały wymienione w tabeli 3.

Zakres czasu preemfazy i deemfazy jest określana dwojako – albo przez stałą czasową (analogową) lub przez opóźnienie zegara w odniesieniu do okresu danych (zazwyczaj wynikającego z zegara cyfrowego). Większość układów kondycjonowania sygnału nie próbuje dokładnie odtworzyć informacji o zegarze. Zakres preemfazy i deemfazy mieści się zazwyczaj w granicach od połowy długości bitu do całego bitu.

Korekcja częstotliwości ma miejsce na odbiorniku. Polega na selektywnym wzmacnianiu wysokich częstotliwości w sygnale danych, aby skompensować silniejsze tłumienie tych składowych w medium. Obwód RLC w korektorze realizuje filtr górnoprzepustowy - jego charakterystyka częstotliwościowa w idealnym przypadku ma być odwrotna w stosunku do strat medium, które korektor stara się skompensować (wykres z rysunku 2).

Energooszczędne korektory z oferty TI (na przykład DS38EP100 czy DS80EP100) to rozwiązanie, które pozwala na korekcję sygnału kabli i płyt tylnych nawet na bardzo wysokich częstotliwościach bez jakiegokolwiek zasilania. Korektory tego typu pozwalają na realizację nowych rozwiązań, na przykład zrównoważonych płyt tylnych, kabli i złącz.

Energooszczędne korektory mogą realizować swoje zadanie poprzez tłumienie składowych niskich częstotliwości przy pomocy układu rezystorów, kondensatorów i cewek. Dzięki temu działają tak samo dla dowolnej technologii (LVDS, CML lub LVPECL). Przebiegi otrzymane na odbiorniku są zbliżone do tych uzyskanych dzięki nadajnikom z deemfazą

Tabela 3. Różnice między preemfazą a deemfazą

Cecha	Preemfaza	Deemfaza
Typowa technologia	LVDS	CML
Wartość międzyszczytowa na wyjściu	Powiększona	Bez zmian
Pobór mocy	Wyższy	Bez zmian
Wartość mierzona	Przyrost dB (+3 dB)	Spadek dB (-3 dB)
Prześwit oczka na odbiorniku	Bez zmian	Obniżony

– odbiornik widzi otwarte oczko, jednak o zmniejszonej amplitudzie.

Energoszczędne korektory mają kilka zalet:

- Swoboda rozmieszczenia – mogą być dodane w dowolnym miejscu ścieżki sygnałowej, na przykład na płycie tylnej lub w środku ścieżki danych)
- Praca dwukierunkowa – dane mogą być przesyłane w obie strony
- Całkowita liniowość – wiele korektorów można łączyć kaskadowo, a na końcu dodać aktywne korektory przywracające odpowiedni poziom sygnału.

Aktywne korektory, jak sugeruje nazwa, używają aktywnych tranzystorów do wzmocnienia sygnałów wysokiej częstotliwości bez tłumienia składowych niskich częstotliwości. Ta metoda działa lepiej z sygnałami o niskich amplitudach, na przykład w przypadku sterowników z deemfazą lub sterowników LVDS bez preemfazy. Dodatkowo aktywne korektory mogą również dobrze tolerować wysokie amplitudy na wejściu. Wewnątrz układu korektora jest kilka stopni wzmacniających, które nasycają sygnał i przywracają pełną amplitudę (rysunek 3). Proces ten jest nieliniowy, z tego powodu aktywne korektory nie powinny być bezpośrednio łączone kaskadowo.

Ponieważ korektory rzadko bywają idealne, zawsze pozostaje pewien poziom interferencji międzysymbolowych. Są one przyczyną wzrostu jitteru na wyjściu, nazywanego resztkowym (*residual*) jitterem deterministycznym. Dobrze zaprojektowane korektory zmniejszą ten jitter poniżej 0,2 UI (UI to interwał jednostkowy, czyli czas trwania jednego bitu przy zadanej szybkości transferu).

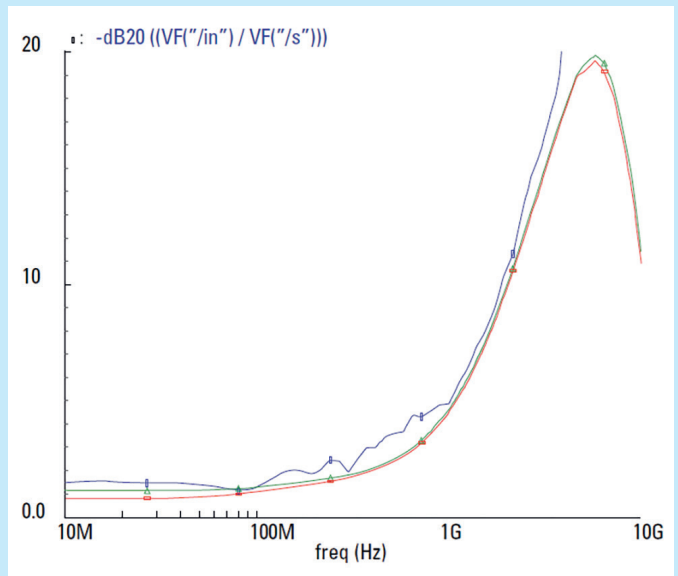
Stale korektory są projektowane w celu korekcji wcześniej ustalonej długości kabla do pewnej maksymalnej szybkości transferu. Stale korektory mają ustaloną krzywą korekcji i w ten sposób wzmacniają pewną stałą częstotliwość o konkretną liczbę decybeli.

Wyjściowy jitter tych korektorów jest zoptymalizowany pod kątem konkretnego kanału i pogorszy się, jeśli kanał jest zbyt krótki lub zbyt długi w porównaniu do długości przewidzianej dla tego korektora. Rozwiązania tego typu powinny być stosowane, gdy kanał transmisyjny jest dobrze znany i nie ulega zmianom.

Zmienne korektory są stosowane, gdy długość kanału transmisji zmienia się w zależności od systemu oraz gdy parametry korekcji muszą być utrzymane niezależnie od szybkości transmisji. Korektory tego typu pozwalają projektantowi systemu na konfigurację parametrów. Regulowane korektory (podobnie jak stałe korektory) są raczej niezależne od konkretnych ciągów przetwarzanych danych.

Wybór jednej z predefiniowanych konfiguracji korektora odbywa się za pomocą pinów układu scalonego (na przykład DS25BR100) lub za pośrednictwem magistrali szeregowej (SMBus dla układu DS64EV400). Pozwala to pojedynczemu korektorowi na obsługę mediów różnej długości (zarówno kabli, jak i ścieżek) bez pogorszenia jitteru, jak to ma miejsce w przypadku stałych korektorów. Jednak to do projektanta systemu należy odpowiednio ustawić/zaprogramowanie charakterystyki korektora na podstawie strat kanału.

Korektory adaptacyjne wykorzystują wewnętrzne algorytmy, aby w sposób automatyczny i niezależny ustalić optymalną krzywą korekcji wymaganą przez medium dołączone do korektora. Często taki algorytm wymaga dokładnej wiedzy o rodzaju kabla, szybkości transferu i sekwencji danych (na przykład 8b/10b). Wskutek tego adaptacyjne korektory pracują dobrze z ograniczonym zestawem mediów transmisyjnych,



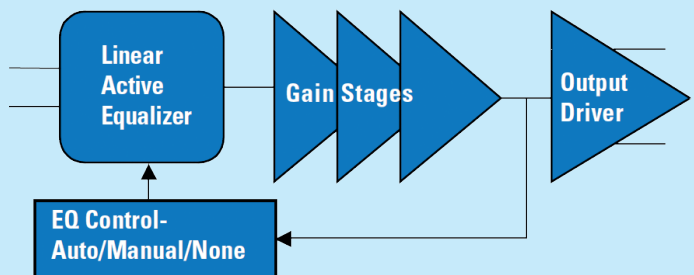
Rysunek 2. Odwrócona charakterystyka kanału (niebieska) i odpowiadająca jej charakterystyka korektora (zielona)

szybkości transferu i sekwencji danych. Rozwiązania tego typu są konieczne, gdy długość medium transmisyjnego zmienia się znacząco i projektant nie może jej dokładnie oszacować. Układy TI LMH0344, LMH0034 oraz DS15EA101 są dobrymi przykładami bardzo zaawansowanych adaptacyjnych korektorów, które automatycznie obsługują kable współosiowe i CAT-5 o różnej długości.

Przesłuchy to niepożądane sprzężenie źródła sygnału z bitami użytecznych danych. Przesłuchy występują, gdy wiele strumieni danych jest prowadzonych blisko siebie i na skutek sprzężenia powstają interferencje elektromagnetyczne. W kablach przesłuchy są skutkiem prowadzenia wielu przewodników w jednym przewodzie. W przypadku złącz przesłuchy wynikają z ich fizycznej struktury.

Przesłuchy stają się istotne na wyższych częstotliwościach i często stanowią czynnik ograniczający transmisję na wielu liniach w tym samym kablu lub złączu. Poziom przesłuchów bywa niemal równy odbieranemu sygnałowi. Przesłuchy są szczególnie uciążliwe, gdy dane płyną w obu kierunkach w jednym kablu lub złączu. W takiej sytuacji odebrany sygnał jest tłumiony w kablu, ale przesłuchy na bliskim końcu są odbierane z pełną mocą.

Aby skompensować przesłuchy, potrzebne są zaawansowane techniki DSP i znajomość sygnału agresora. Bardzo trudno jest poradzić sobie z przesłuchami na wyższych częstotliwościach, gdzie realizacja



Rysunek 3. Topologia aktywnego korektora

zaawansowanych algorytmów DSP jest niepraktyczna. Przesłuchów nie można też usunąć poprzez korekcję częstotliwości. W rzeczywistości korekcja wzmacnia wysokie częstotliwości przesłuchów wraz z sygnałem użytecznym.

Z tego powodu najlepszą strategią walki z przesłuchami jest zapobieganie im. Projektant systemu powinien stosować najwolniejsze możliwe zbrocza sygnału. Ogranicza to energię wysokich częstotliwości i zmniejsza przesłuchy. Z drugiej strony zbyt wolne zbrocza sygnału powodują interferencje międzysymbolowe i tłumią sygnał użyteczny. Równowaga między tymi efektami musi zostać starannie dobrana. W typowej sytuacji zbrocza sygnału nie powinny być wolniejsze, niż jedna trzecia długości bitu. Projektant systemu powinien dobrać kable, w których pary przewodów są osobno ekranowane i używać wydajnych złącz wprowadzających małe przesłuchy.

Odbicia są wynikiem przesyłania sygnału o ostrych zbroczach i wysokiej częstotliwości przez nieciągłą impedancję, która występuje w kanale. W prawidłowo zatępnionym kanale bez nieciągłości impedancji sygnał płynie z nadajnika i jest w całości pochłaniany przez odbiornik. Jeśli terminacja jest prawidłowa (idealna), nie występują odbicia. Jeśli jednak sygnał napotka nieciągłość, część sygnału jest odbijana z powrotem do źródła.

Przykładowo, jeśli impedancja źródła nie jest prawidłowo dopasowana do obciążenia, sygnał zostanie odbity z powrotem w stronę nadajnika. Wówczas odbiornik otrzyma wiele stłumionych kopii tego samego sygnału w różnych chwilach czasowych. Wielokrotne pojawienie się sygnału na odbiorniku prowadzi do interferencji międzysymbolowych. Nieciągłości impedancji pochodzą zazwyczaj ze złącz, przelotek na płytach PC oraz niepoprawnie dobranych rezystorów terminujących.

Liniowe korektory nie są w stanie przewidzieć, w którym miejscu ścieżki sygnału pojawiają się nieciągłości. Co więcej, w przypadku długich kanałów odbicia potrzebują względnie dużej ilości czasu, aby dotrzeć do odbiornika. Trudno jest zatem odróżnić sygnał odbity od pożądanego bez wykorzystania technik DSP. Wobec tego żadne korektory wysokiej szybkości nie są w stanie skompensować odbić.

W przypadku przesłuchów najlepszą metodą walki z odbiciami jest wykorzystanie wysokiej jakości złącz i stosowanie odpowiednich technik projektowania dla wysokich częstotliwości. Projektanci systemów powinni uważnie ocenić straty odbiciowe i pojemność wejściową używanych układów. Typowe straty odbiciowe powinny być lepsze, niż -10 dB, a pojemność mniejsza niż 2 pF. TI ma w ofercie kilka układów kondycjonowania sygnału, które spełniają te wymagania, na przykład rodzinę DS25BR100 oraz DS64EV400.

Zarówno preemfaza, jak i deemfaza oraz korektory częstotliwości próbują rozwiązać problem interferencji międzysymbolowych. Preemfaza i deemfaza mają miejsce po stronie nadajnika, a korekcja po stronie odbiornika. Jeśli zarówno strona odbiornika, jak i nadajnika jest projektowana przez twórcę systemu, możliwe jest użycie preemfazy/deemfazy i korekcji w tym samym kanale, aby poprawić uzyskiwane parametry. Istnieje jednak kilka kwestii, które należy uwzględnić, w tym charakterystyki sterownika z preemfazą/deemfazą, medium transmisyjne i charakterystykę korektora po stronie nadajnika.

Wszystkie parametry systemu muszą być zgodne. Brak zgodności może doprowadzić do wzmocnienia szumów i jitteru deterministycznego. Po drugie, projektant systemu musi uwzględnić dodatkowe odbicia i przesłuchy. Sterownik z preemfazą/deemfazą wzmacnia wysokie częstotliwości, co może doprowadzić do przesłuchów, odbić i emisji elektromagnetycznej. Wszystkie te artefakty na wysokich częstotliwościach będą następnie wzmacniane przez korektor po stronie odbiornika. Jednocześnie preemfaza wymaga większej mocy nadajnika.

Z tego powodu dobra strategią jest zastosowanie najpierw maksymalnej korekcji po stronie

odbiornika. Jeśli to będzie niewystarczające, można zwiększyć poziom preemfazy. Spełnienie tych ograniczeń może być łatwiejsze dzięki rodzinie buforów TI DSBR100/110/120/150. Zawierają one kilka kombinacji funkcji preemfazy i korekcji, które można stosować razem.

Szum losowy powstaje na skutek losowego zachowania elektronów i losowych przesłuchów, które pojawiają się ich drodze przez ścieżkę elektryczną. Wszystkie układy elektryczne wprowadzają pewien poziom losowych szumów, które ostatecznie są widoczne jako szum napięcia i prowadzą do losowego jitteru widocznego na zbroczach sygnału. Prawdziwie losowy szum ma rozkład Gaussa i jest określany poprzez wartość średniokwadratową lub wartość międzyszczytową. Druga miara zakłada określoną wartość stopy błędów (BER). Losowy szum i jitter nie są przewidywalne, zatem nie można ich skompensować poprzez korekcję.

Źródła jitteru losowego można podzielić według trzech głównych części systemu: jitter sterownika, jitter kanału i jitter odbiornika. Jitter sterownika wynika z jakości sygnału zegarowego sterownika i szumu losowego samego sterownika. Poprawnie zaprojektowany podsystem sterownika może uzyskać jitter zegara poniżej 0,1 UI (wartość międzyszczytowa). Media transmisyjne są zazwyczaj pasywne i same w sobie nie mają dużego udziału w powstawaniu jitteru losowego. Korektor po stronie odbiornika musi wzmocnić sygnał, który został stłumiony przez kanał. Na skutek wzmacniania rośnie też poziom szumów, co przekłada się na wzrost jitteru losowego. Prawidłowo zaprojektowany korektor może uzyskać jitter losowy o wartości międzyszczytowej poniżej 0,2 UI.

Warto przypomnieć, że korektor po stronie odbiornika nie zmniejsza poziomu jitteru losowego. O ile jitter deterministyczny maleje, to jitter losowy po korekcji rośnie. Aby bardziej obniżyć jitter losowy, korektory TI są wykonywane z użyciem zaawansowanych układów bipolarnych i rozwiązań układowych.

Aby walczyć ze zjawiskiem jitteru losowego, przesłuchami, odbiciami i szumem jitterem deterministycznym, projektanci muszą korzystać z innego rodzaju układu kondycjonowania sygnału, reclockera. Reclocker jest urządzeniem, które bierze przychodzący sygnał i próbuje do niego dopasować swój wewnętrzny sygnał zegarowy. Po uzyskaniu najlepszego dopasowania reclocker używa wewnętrznego zegara, zwanego zegarem odtwarzania (*recover clock*), aby dokonać resamplingu odebranych danych. Ten proces i związane z nim układy stanowią podstawę systemów CDR.

Reclocking polega na próbkowaniu przychodzących danych dokładnie pośrodku oczka i zapisywaniu wyniku jako binarne 0 lub 1. Idealny sygnał na wyjściu takiego układu nie ma ani jitteru amplitudy, ani jitteru czasowego. W praktyce wewnętrzne źródło zegara samo wnosi jitter czasowy, co prowadzi do powstania pewnego resztkowego jitteru. Co więcej, układ odtwarzania zegara nie może dopasować się do nadchodzących danych w przypadku bardzo silnego jitteru deterministycznego i losowego. Proces próbkowania sprawia, że częściowo zamknięte oczko w sekwencji wejściowej może doprowadzić do uzyskania otwartego oczka na wyjściu, ale z błędnym stanem bitu.

Z tego powodu projektanci systemów muszą polegać na testach stopy błędów (BERT), aby zapewnić brak błędów pojawiających się podczas pracy systemu. Wartość odbieranego jitteru, które system CDR może tolerować bez przekłamań bitów nosi nazwę tolerancji jitteru wejściowego jitteru (*input jitter tolerance*, IJT). Przykładowy układ tego typu TI LMH0346 potrafi odtworzyć dane w obecności jitteru do 0,6 UI.

Jitter wprowadzany przez interferencje międzysymbolowe kanału zazwyczaj umożliwia nawet najlepszym układom CDR. Z tego powodu w większości zastosowań korektor na odbiorniku lub preemfaza po stronie sterownika zawsze poprzedza reclocker.

Andrzej Gawryluk, EP