



Jitteranalys med oscilloskop

Analys i tids- och frekvensdomän ett måste



Av Mathias Hellwig, Rohde & Schwarz

Dr. Mathias Hellwig kom till Rohde & Schwarz i München år 2012 som senior applikationsingenjör. Innan dess arbetade han hos Emerson Network Power som systemarkitekt specialiserad på inbyggda system. Han har också arbetat hos Motorola och halvledartillverkarna Intel, Multilink och Infineon.

När det gäller överföring av signaler är jitter en viktig begränsning som kräver detaljerad analys och karaktärisering. Vanligtvis kan ett oscilloskop enbart användas för tidsbaserad analys. RTO-serien från Rohde & Schwarz kan också göra FFT på mätvärdena vilket medför att instrumentet kan visa spektrum. Detta gör det möjligt för användaren att snabbt identifiera fasbrus, oönskade svängningar och slumpmässigt jitter.

När man skickar digitala signaler över bussar som PCIe, DDR, USB och Ethernet försämras signalintegriteten vartefter datahastigheten ökar. Idag handlar det om gigabithastigheter. Samtidigt diktar kostnaderna att man håller sig till mönsterkort med klassiskt FR4-substrat vilket tillsammans med viahål försämrar överföringskaraktäristiken. Vid så höga datahastigheter är denna påverkan långt ifrån negligerbar. De som utvecklar kretsarna måste snabbt kunna göra en detaljerad signalanalys för att tidigt identifiera problemområden.

Internationella Teleunionen (ITU) definierar jitter som kortvariga variationer för viktiga punkter hos en klocksignal jämfört

med deras ideala position i förhållande till tiden. Här kommer jitter att beskrivas som icke förutsägbara störningar hos en klocksignal. Jitter har inte en enskild orsak. Det totala jittret (TJ) hos en signal består av slumpmässigt jitter och deterministiskt jitter. Slumpmässigt jitter är obegränsat i sin definition. Det kan beskrivas i form av statistiska termer som medelvärde μ och standardavvikelse σ . Sannolikhetstäthetsfunktionen (PDF – Probability Density Function) är den välkända Gaussfördelningen. Orsakat av termiskt brus, hagelbrus och liknande fenomen, kan slumpmässigt jitter beskrivas som fasbrus hos oscillerande signaler.

Det deterministiska jittret däremot är begränsat och kan inte beskrivas som en slumpmässig fasbrussignal. Dessa jitterkomponenter beskrivs ofta med topp-till-toppvärden. Deterministiskt jitter innefattar:

- periodiskt jitter
- databeroende jitter
- distorsion av pulsförhållande

PERIODISKT JITTER kan orsakas av överhörning eller instabilitet i en fastlåst loop (PLL). Dess sannolikhetstäthetsfunktion beror på källan. Överhörning från digitala signa-

ler ger ofta en sannolikhetstäthetsfunktion som en Diracpuls, medan den för rena sinussignaler motsvarar en Dopplersannolikhetstäthetsfunktion.

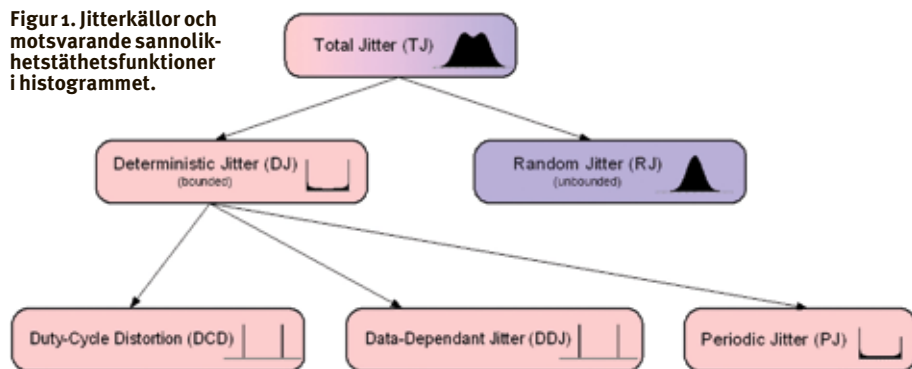
Databeroende jitter orsakas också av intersymbolinterferens (ISI). Dess dubbla Diracsannolikhetstäthetsfunktion ligger symmetriskt runt sin tidsmässiga utgångspunkt.

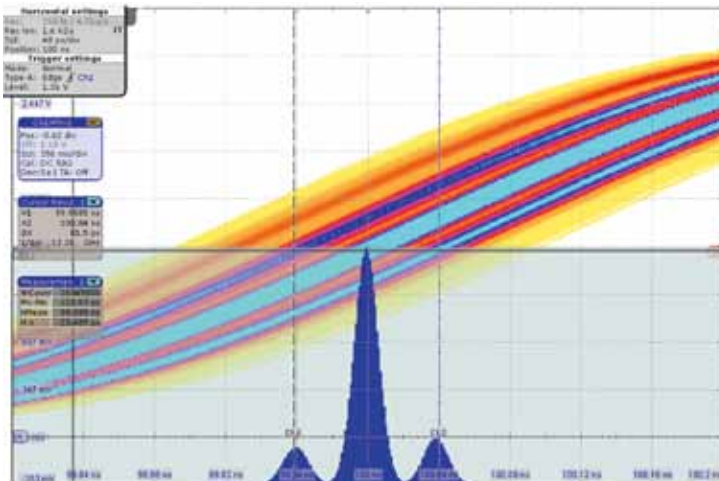
Distorsion av pulsförhållande uppstår på grund av icke optimala beslutsgränser eller skillnader i stig- och falltider och kan som databeroende jitter representeras av en dubbel Diracsannolikhetstäthetsfunktion.

Det är viktigt att förstå orsaker och källor för varje jitterkomponent när man tolkar histogrammet för en sannolikhetstäthetsfunktion i samband med jitteranalys. Oscilloskopets jitteranalysfunktion genererar ett histogram som avbildar den totala frekvensdistributionen för jittret (figur 2), som är summan av alla sannolikhetstäthetsfunktioner för de enskilda jitterkällorna.

ETT OSCILLOSKOP INNEHÅLLER ett antal olika verktyg för att analysera jitter. Även utan en jitteroption ger ett oscilloskop som RTO möjligheter att visa vågformshistogram med minnesfunktion som visar en färgkodad överlagring av alla vågformer. Figur 2, till exempel, visar mer än 26 miljoner överlagrade vågformer. De områden som har den högsta densiteten visas i blått. Histogrammet nedanför visar frekvensfördelningen för vågformerna. På så sätt får man enkelt en överblick hur signalens flanker ligger i tiden. Den högsta tätheten för signalövergångar ligger runt 100 ns – här det breda blå fältet i mitten av det överlagrade färgbandet. Den mycket lägre frekvensfördelningen till vänster motsvarar det övre blå området och den till höger runt 100,04 ns det smala blå bandet nedanför. Användaren kan i histogrammet bestämma de

Figur 1. Jitterkällor och motsvarande sannolikhetstäthetsfunktioner i histogrammet.





Figur 2. Jitteranalys med hjälp av vågformer, histogram och minnesfunktion.



Figur 3. Jittermätningar med jitteranalysalternativen RTO-K12.

statistiska värdena för distributionen genom att använda markörerna och automatiska mätfunktioner.

JITTERANALYSALTERNATIVET RTO-K12 ger ytterligare funktioner för att mäta parametrar som periodiskt jitter, datahastighet och tidsintervallfel (TIE – Time Interval Error) genom en enkel knapptryckning. Alternativet ger också ett antal presentationsmöjligheter. Förutom att visa tabeller och histogram kan man se jittervärdena som tidsfunktion (Track). RTO kan också använda FFT (Fast Fourier Transform) för att beräkna jitterspektrat hos tidssignalen. En unik funktion som inte finns hos några andra jämförbara oscilloskop. Genom att betrakta jittersignalen i frekvensdomänen kan användaren detektera små deterministiska jitterkomponenter som annars skulle vara dolda av brus (figur 3). Användaren kan också med hjälp av storleken och beteendet på brusgolvet identifiera brus-effekt och enskilda bruskomponenter, en uppgift som normalt bara är möjlig med hjälp av en signalanalysator.

Ett oscilloskop mäter huvudsakligen i tidsdomänen och är det verktyg man väljer för att analysera jitter i kretsar som utvecklas för och testas i tidsdomänen. Icke-periodiska signaler som datasignaler med inbyggd klocka kan registreras och under-

sökas i tidsdomänen, vilket gör det möjligt att detektera sporadiska oönskade signaler i vågformerna. Däremot kan man snabbare identifiera fasbrus, oönskade oscillationer och slumpmässigt jitter med hjälp av analys i frekvensdomänen.

Jämförelse av jitteranalys i tids- och frekvensdomän

- Tidsdomän
- Frekvensdomän
- Ingående mätningar
- Topp till topp jitter
- Period till period jitter
- Periodiskt jitter
- RMS fasjitter
- Fasbrus
- Jitterspektrum
- Fördelar
- Kan användas vid låg klockfrekvens
- Mätning av databeroende jitter
- Mätning av jitter över tid (Track)
- Enkel detektering av oönskad oscillationer och slumpmässigt jitter
- Typiskt lågt brusgolv tack vare stort dynamiskt område

FIGUR 4 VISAR de viktigaste jittermätfunktionerna – periodiskt jitter, period till periodjitter och tidsintervallfel (TIE) – med referens till den uppmätta signalen i tidsdomänen. Signalen i detta exempel är en

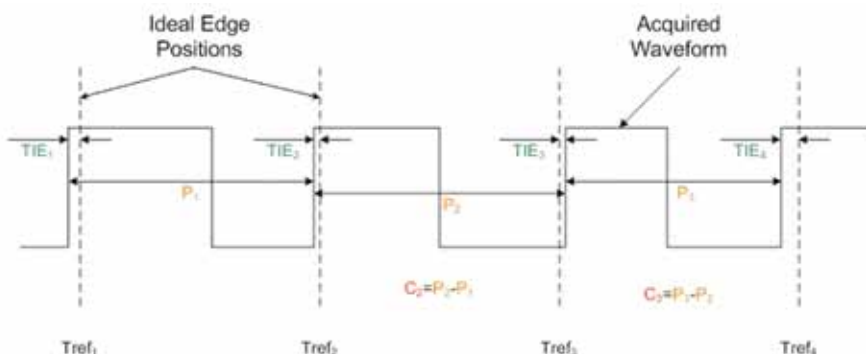
digital klocksignal som motsvarar en periodisk signal. Matematisk analys av dessa mätningar som funktion av insignalen är komplex.

Jitteranalys med ett oscilloskop är jämförbart med att sampla fasbruset där samplingsfrekvensen motsvarar signalens nominella frekvens. De mätfunktioner som används, till exempel periodiskt jitter och tidsintervallfel (TIE) är att se som filterfunktioner som används på den samplade signalen. Eftersom samplingsfrekvensen är begränsad och fasbruset inte är bandbegränsat, kan man få problem med vinkningsdistorsion. På grund av detta kan man få mer exakta resultat om man mäter fasbruset hos periodiska signaler i frekvensdomänen.

MÄTFUNKTIONEN för periodiskt jitter gör det möjligt för användaren att utföra omfattande analys som exempelvis utvärdering av stabiliteten hos en referens-klocka. Oscilloskopet beräknar det periodiska jittret med hjälp av skillnaden mellan på varandra följande flankpositioner hos signalen som referens. För enkla klockkällor som kristaloscillatorer, kan tidsfunktionen för det periodiska jittret ses som en konstant med överlagrat brus (track 1 i figur 5).

Tittar man på histogrammet blir det uppenbart att medelvärdet hos mätningen motsvarar den nominella periodtiden (99,999 ns). Standardavvikelsen för mätningen är 31,145 ps (se tabellen i figur 5), vilket motsvarar brus-effekten hos signalens fasbrus. Förutom den stokastiska analysen kan Track-funktionen användas för att visa modulerade signaler. Detta är överlagret till exempel när det gäller att analysera radarsignaler. Det måste dock observeras att denna mätfunktion enbart är användbar för periodiska signaler.

Jittermätfunktionen period-till-period är väldigt lik mätfunktionen för periodiskt jitter. Den beräknar skillnaden mellan på



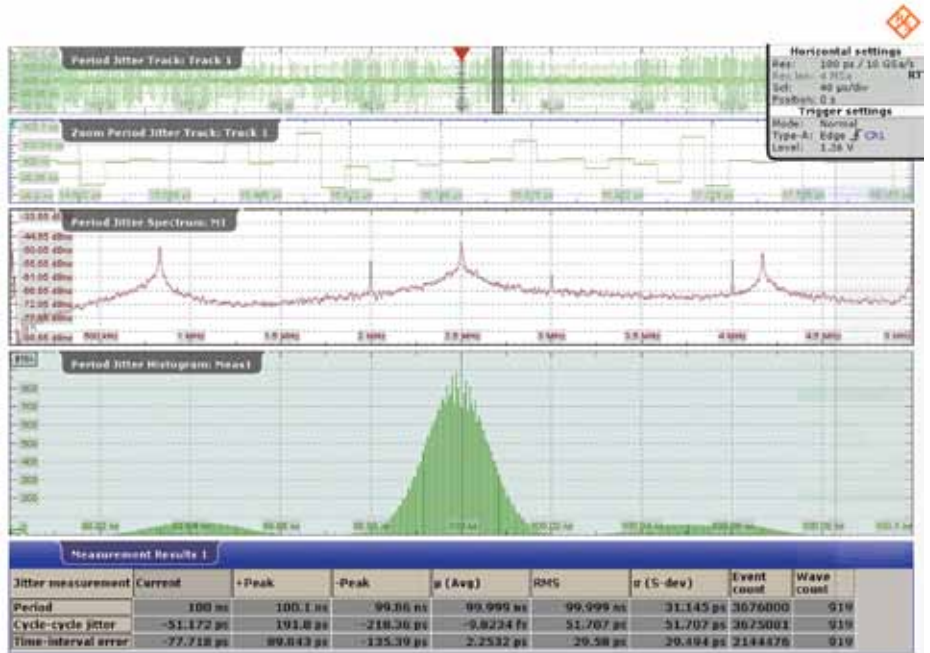
Figur 4. Definition av jittermätfunktioner för periodiskt jitter (P_1), period till period (C_2) och TIE jitter.

varandra pulsperioder och kan endast appliceras på periodiska signaler som oscillatorstabilitet eller det dynamiska beteendet för PLL:er.

MÄTFUNKTIONEN FÖR TIE JITTER kan användas på klock- och datasignaler. Den beräknar skillnaden mellan aktuell flankposition och motsvarande n:te ideala flankposition. Detta är ett avsteg från den ursprungliga definitionen av ITU men är allmänt accepterat för oscilloskopmätfunktionen – termen TIE används härefter i enlighet med detta. Mätfunktionen för TIE-jitter kan användas för att utvärdera överföringen av en digital dataström med inbyggd klocka. När man mäter TIE behöver oscilloskopet inte enbart bestämma verklig flankposition utan också den okända ideala flankpositionen. Det finns två metoder för detta. Den första och enklaste är att estimera ett konstant intervall med hjälp av minstakvadratmetoden. Denna bygger på antagandet att frekvensen är konstant. Så är emellertid inte alltid fallet. Den ingående klockan kan ändra sig under datainsamlingen beroende på faktorer som "Spread Spectrum" teknik som är fallet för till exempel PCIe. I sådana fall är det bättre att använda en PLL eller CDR (Clock Data Recovery) för att bestämma den ideala flankpositionen.

Oscilloskop har normalt mjukvaruimplementerade CDR-lösningar som beräknar den ideala flankpositionen för en enstaka datainsamlingssekvens baserat på den tidigare serien av övergångar. För att säkerställa korrekt beräkning av ideal flankposition måste många övergångar samlas in på grund av att CDR har en insvängningstid i början av varje datainsamlingsomgång. Det innebär att endast ett mindre antal mätningar genomförs trots lång datainsamlingsstid. Samplingsfrekvensen påverkar också noggrannheten för den beräknade ideala flanken. Minskar man samplingsfrekvensen för att öka längden hos insamlingssekvensen kan man få instabilitet i mjukvarubaserad CDR. Bristen på information leder till felaktiga mätresultat.

För att avhjälpa detta, har Rohde & Schwarz utvecklat en hårdvarubaserad CDR. Denna option ingår som en del i den ASIC som hanterar datainsamling och dataprocessande. Den är den första av sin typ



Figur 5. Periodiskt jitter som tidsfunktion, spektrum och histogram med statistisk analys.

som tillåter trigging baserad på den inbyggda klockan och signalanalys i realtid. Den arbetar hela tiden med maximal samplingshastighet. Det förhindrar instabilitet och dödtid i början av insamlingssekvenserna. Denna hårdvarubaserade CDR tillåter att oscilloskopet analyserar signalintegritet på seriella gränssnitt i realtid med en hastighet upp till 5 Gbit/s.

FÖR ATT FÅ ENTYDIGA mätresultat måste användaren ta reda på om oscilloskopet verkligen är användbart för de tänkta jitteranalysuppgifterna. Samplingshastigheten och bandbredden hos oscilloskopet är kritiska. Nyquist teorem måste man alltid ta hänsyn till (samplingsfrekvensen måste alltid vara minst två gånger signalens bandbredd). Också digitala signaler med låg datahastighet eller låg klockfrekvens kan ha väldigt branta flanker på grund av hörfrekventa signalkomponenter. På grund av detta behöver oscilloskopets analoga bandbredd vara väsentligt högre än signalbandbredden.

Bruset hos oscilloskopets ingångssteg och noggrannheten hos dess tidbas är andra faktorer som påverkar mätningens noggrannhet. Om signalnivån är låg och

flanken har lång stigtid kan bruset från oscilloskopets analoga ingång (VN) dominera resultatet från jitteranalysen (figur 6).

Tidbasen bygger på en oscillator som fungerar som referensklocka. Variationer hos denna interna oscillator ger långtidsförändringar. Om man använder en PLL för att multiplicera referensklockan till A/D-omvandlarens samplingsfrekvens produceras dessutom kortvariga variationer.

Ingångsbrus, brantheten hos signalens flanker och tidbasens stabilitet definierar den interna begränsningen för jittermätningar med ett oscilloskop. Denna begränsning definieras som Jitter Noise Floor (JNF) och kallas också tids-RMS-värde. Ekvationen nedan definierar JNF tJNF som funktion av:

$$VN = \text{ingångsbrus i volt (RMS)}$$

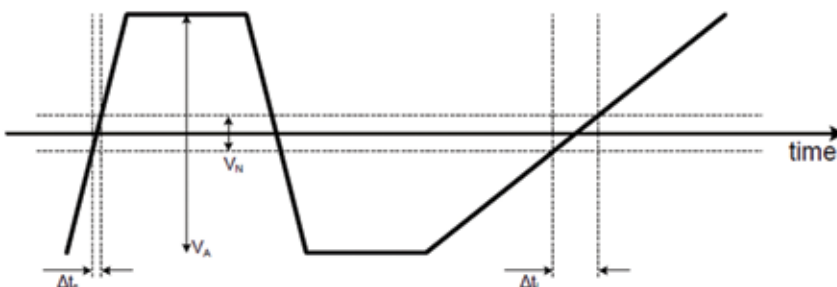
$$VA = \text{signalamplitud i volt}$$

$$FS = \text{fullt skalutslag (signalamplitud/vertikalt område)}$$

$$tr = \text{stigtid från 10 till 90 procent i sekunder}$$

$$tj = \text{fluktuationer i samplingshastighet i sekunder (RMS)}$$

DEN FÖRSTA TERMEN i formeln representerar effekten av brus och stigtiden hos signalens flank. Den andra termen representerar de kortvariga variationerna från samplingsklockan. Om till exempel en RTO1024 används för att mäta en 2 GHz sinusformad signal med amplitud av 480 mV, ger den ett VN av 2,39 mV vid 50 Ohm med en vertikal upplösning av 100 mV per ruta. Tidbasens noggrannhet tj är ± 5 ppm med en standard VCXO (spänningsstyrd kristaloscillator) och $\pm 0,02$ ppm med hårdvaruoptionen RTO-B4 som är en ugnskontrollerad kristaloscillator (OCXO). RTO1024 uppnår en utomordentligt låg JNF om bara 440 fs med en standard VCXO konfiguration. ■



Figur 6. Inverkan av brus från den analoga ingången på noggrannheten vid mätning av tid.