

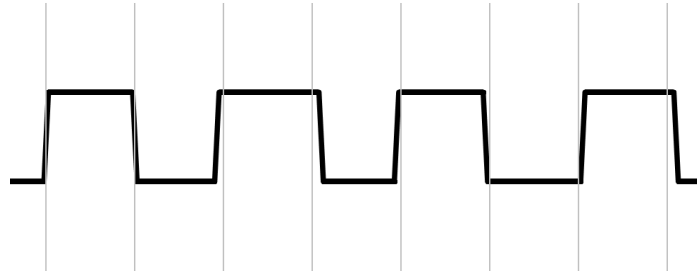


Peđa Rogić

# Problem jittera u audiu

Oktoibar 2006.

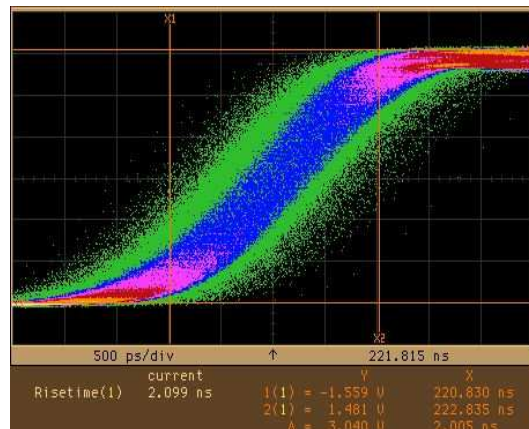
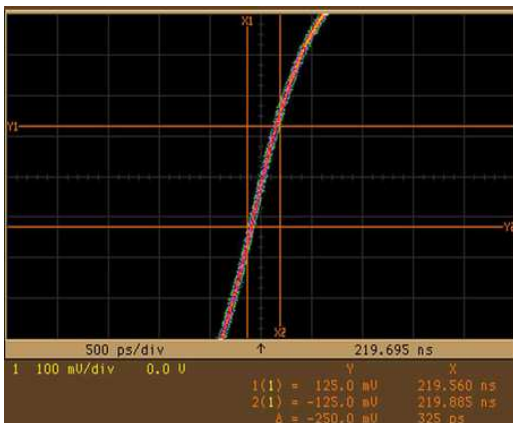
Jitter se generalno definiše kao greška u vremenskoj određenosti trenutka prelaska signala iz jednog stanja u drugo odnosno, kada se radi o clock signalima, u jednakosti dužina trajanja pojedinačnih oscilacija. To na primer znači da su intervali oscilacija clocka frekvencije 10MHz umesto na svakih 100 nanosekundi u praksi prvo recimo 99.964ns, pa 100.22ns, pa 99.99ns...



Slika 1: Jitter clock linije

Jitter se izražava u jedinici vremena, pri čemu su najbolji podaci kojima se u audio operiše kao ukupnim vrednostima reda nekoliko desetina do nekoliko stotina pikosekundi i kod većine uređaja nisu veći od nekoliko nanosekundi.

Jitter se može direktno posmatrati na osciloskopu velikog frekvencijskog opsega kao problem sa triggerovanjem. Zbog nepravilnosti vremenskih intervala pojedinih oscilacija slope izgleda razmazano. Na slikama ispod može se videti kako na kolor osciloskopu izgledaju clock signali, odnosno njihove ivice (raising edge) sa jitterom od nešto manje od 100ps i oko 2ns.



Slike 2 i 3: Jitter od 100ps i 2ns na kolor osciloskopu

Granična vrednost jittera koji može biti od interesa u isključivo digitalnim transmisijama se generalno vezuje za UI (Unit Interval), odnosno najkraći vremenski period između dve promene stanja signala. Pod digitalnom transmisijom podrazumevamo proces kod koga signal u potpunosti ostaje u digitalnom domenu, odnosno proces koji isključuje njegovu konverziju u analogni signal. Za maločas pomenuti signal od 10MHz, čije je trajanje oscilacije 100ns, sa idealno simetričnim (50% / 50%) poluperiodama UI je 50ns. Ukoliko bi vršna (peak) vrednost jittera bila veća od vremena koje je jednako ili veće od polovine UI, ova vremenska greška bi mogla da uzrokuje greške u samim podacima.<sup>1)</sup> Pošto su frekvencije clockova kojima operiše digitalni PCM audio uglavnom između 2.1168MHz (BCK kod non-o/s uređaja sa 24-bitnim frameom) i 45.1584 MHz (MCK kod nekih Sonyjevih uređaja), vreme oscilacija je između 22.144ns i 472.4ns, odnosno UI je između 11ns i 236.2ns, jitter koji bi u ovom smislu bio od interesa imao bi vrednost 5.5ns do 118.1ns. Ispuniti zahtev za jitterom manjim od ovog je tehnički manje-više trivijalan zadatak.

Ipak, u audio od interesa mogu biti znatno niže vrednosti jittera. Razlog ovome je činjenica da jitter clock signala upotrebljenog za triggerovanje konvertera „učestvuje“ u konverziji tako što proizvodi specifične artefakte u rezultujućem analognom signalu (tvrdnja je primenjiva i na A/D kao i na D/A konverziju). Na mehanizme kojima se ovo dešava ćemo se vratiti kasnije, nakon što se pozabavimo sa par osnovnih pojmova iz fenomenologije jittera. Pre svega...

## ***Odakle uopšte jitter?***

Temeljni uzrok jittera jeste šum, odnosno jitter je pre svega posledica toga da se šum iz svog izvornog domena, domena amplitude, a zbog konačnog raise time-a clock signala (brzina rasta svakog signala uvek je konačna veličina) transponuje u domen vremena. Stoga se jitter može razumeti kao šum u domenu vremena. Iz istog razloga ponekad se za jitter sinonimno koristi termin *phase noise*, ali treba imati na umu da se termin jitter koristi univerzalno pri analizi upravo opisanih vremenskih grešaka, dok termin *phase noise* uglavnom označava spektralnu analizu clock signala, odnosno analizu jittera u domenu frekvencije.

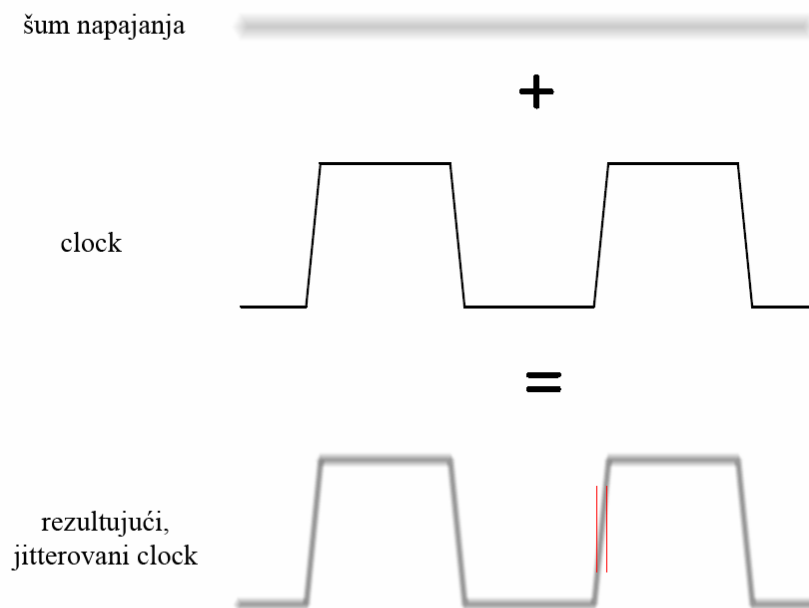
Slično fenomenu da sva kola odnosno komponente imaju svoj intrinzični, manji ili veći šum, tako i svaki deo lanca koji operiše clock signalom, odnosno stoji na njegovom putu, počev od samog izvora, odnosno oscilatora, pa do D/A konvertera ima svoj intrinzični, manji ili veći, jitter. Govoreći na nivou primera, Colpitts oscilator recimo ima manji jitter od Pierce oscilatora ili PLL-om generisanog clocka.

---

1) Ovo je unekoliko pojednostavljeno objašnjenje; u praksi svaka digitalna transmisija uključuje i određeni sistem za korekciju greške pa se i dozvoljeni nivo jittera preciznije specifikuje obzirom na dozvoljeni Bit Error Rate (BER), odnosno nivo grešaka nakon koga originalni podaci više ne mogu biti rekonstruisani. [2]

Tvrđnja o fundamentalnoj korelaciji između šuma i jittera podrazumeva da svaki klasično razmatrani šum, bilo da je uzrokovan interno (samim kolom, odnosno njegovim komponentama, ili recimo napajanjem) ili eksterno (recimo RF smetnjama), koji dospeva na liniju clock signala može biti transponovan iz domena amplitude u domen vremena, odnosno konvertovan u jitter.

Kada se radi o napajanju, treba imati na umu da logička kola u praksi imaju skoro zanemarljiv PSRR od 6dB tj. 2 puta (PSRR tj. Power Supply Rejection Ratio predstavlja sposobnost kola da „potisne“ šum napajanja, u smislu da isti ne dospe na liniju signala). Ova znači recimo da 10mV šuma na liniji napajanja 5V logike sa vremenom rasta signala od 30ns (1V/6ns) i 6dB PSRR za rezultat ima jitter od 30ps. Ovo je razlog zbog koga se za rad sa linijama clock signala insistira na niskošumnim napajanjima. Slika 4 demonstrira ovu situaciju sa napajanjem (PSRR od 6dB je uzet u obzir ali zbog očiglednijeg prikaza upravo pomenute veličine ne odgovaraju veličinama/proporcijama sa ove slike). Ista slika dovoljno dobro predstavlja uopšten način na koji se bilo koji eksterno uzrokovani šum transponuje u jitter.



Slika 4

Osim intrinzičnog i jittera uzrokovanog eksternim izvorima šuma postoji i nekoliko drugih mehanizama odnosno uzroka nastanka ili uvećanja postojećeg nivoa jittera. U prve, odnosno uzročnike bi spadale recimo refleksije u interfaceu, dok bi frekvencijska limitiranost, odnosno limitiranost raise timea interfacea bila u direktnoj vezi sa stepenom u kome se šum iz domena amplitude transponuje u domen vremena. Ovi dodatni

mehanizmi generisanja odnosno uvećanja nivoa postojećeg jittera su unekoliko specifični obzirom na konkretan reproduktivni digitalni sistem, pa se može govoriti recimo o specifičnim problemima S/PDIF standarda ili problemima optičke veze korišćene na S/PDIF liniji. Kod konkretno pomenutog S/PDIF-a (a koji inače pati od oba malopre pomenuta problema, i refleksija i frekvencijske limitiranosti) kod koga je digitalni signal Biphase Mark (Manchester) kodiran, odnosno kod koga je originalni clock signal integrisan u podatke, jitter koji se javi u ovakvom interfaceu može da se nakon dekodiranja manifestuje kao data related jitter (više o data related jitteru kasnije u ovom tekstu, a o problemima jittera u S/PDIF interfaceu u tekstu koji će se posebno baviti delovima digitalnog reproduktivnog lanca baziranog na CD formatu a koji će uskoro takođe moći da se pronade na [www.audialonline.com](http://www.audialonline.com) ).

## ***Spektralna struktura jittera***

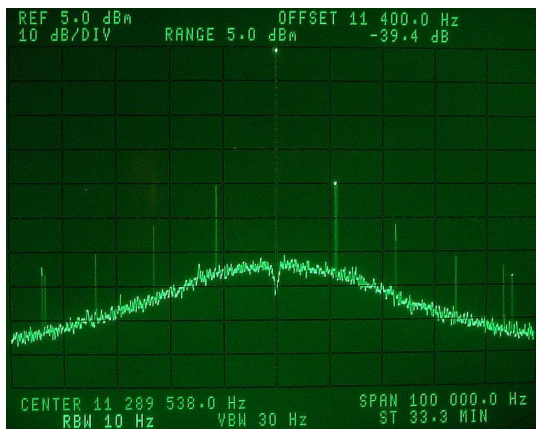
Kao što je napomenuto, i jitter ima strukturu, odnosno može se specifikovati obzirom na (ne)određenost frekvencijskog spektra, upravo kao i klasičan šum. Ukoliko je širokog, odnosno neodređenog frekvencijskog spektra naziva se wideband, odnosno random ili Gaussian jitter. Ukoliko se njegova spektralna struktura može definisati u smislu pojedinačnih komponenti onda govorimo o determinisanom jitteru. Dalje, ukoliko determinisani jitter ima samo jednu komponentu govorimo o sinusoidalnom jitteru. Kod determinisanog jittera uzroci su lakše određivi; recimo jitter od 100Hz se praktično bez daljeg može pripisati napajanju. Ukoliko je jitter uzrokovan samim podacima na digitalnoj liniji govorimo o data related jitteru. U praksi je jitter skoro uvek kombinacija wideband i determinisanog jittera a ukupna vrednost jittera je njihov zbir.

Prethodno rečeno, odnosno razumevanje jittera kao šuma u domenu vremena, čini razumljivom i ponekad ignorisanu a često bitnu razliku između jittera specifikovanog kroz peak-to-peak i kroz RMS vrednost.

Šta praktično znači to da jitter ima recimo vrednost 1ns peak-to-peak i da ima frekvenciju 100Hz? To znači da vreme trajanja oscilacije clocka menja svoju dužinu od oscilacije do oscilacije i to na taj način da se maksimalno skraćuje za 500ps a zatim maksimalno produžava za 500ps i da se ovo skraćivanje i produžavanje menja unutar ovih  $\pm 500$ ps kao sinusna funkcija 100 puta u sekundi. Jednostavno? Verujem jednostavnije nego što se često misli. Analogno upravo rečenom, random jitter označava promenu trajanja dužine oscilacije pri čemu se ova promena dužine dešava bez ikakvog redosleda, odnosno nasumce tj. slučajno (randomly).

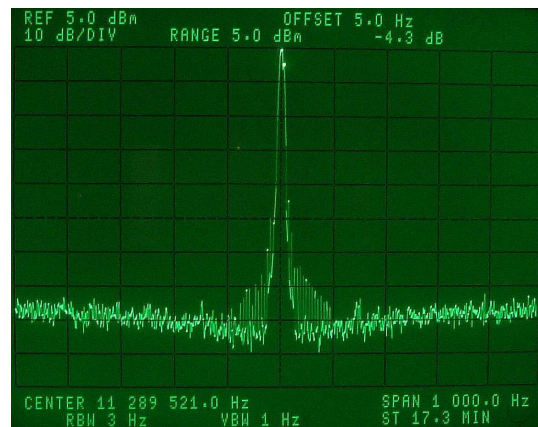
Kao što je pomenuto, termin *phase noise* pre svega označava spektralnu analizu clock signala. Idealan clock signal, odnosno clock bez jittera, analiziran u domenu frekvencije bi imao samo svoju osnovnu komponentu (odnosno frekvenciju) i, zbog činjenice da se ne radi o čistom sinusnom nego o pretpostavljeno kvadratnom signalu, komponente na frekvencijama koje se neparni sadržavaju osnovne frekvencije. Pri frekvencijskoj analizi clock signala jitter se, kao i svaka frekvencijska (fazna) modulacija, manifestuje u obliku parazitskog sadržaja simetrično postavljenog oko noseće frekvencije. Determinisani jitter

je vidljiv u obliku jasnih diskretnih sidebandova. To znači da će jitter frekvencije recimo 1kHz pri spektralnoj analizi clock signala biti vidljiv kao dva parazitska signala oko osnovne frekvencije, prvi 1kHz ispod, drugi 1kHz iznad nje. Osim ovako vidljivih komponenti, tipičan način manifestacije jittera jeste i „suknja” (skirt) oko osnovne frekvencije. Nedeterminisani odnosno random jitter se na spektralnoj analizi clock signala pojavljuje kao wideband šum. Treba imati u vidu i to da se i eventualna amplitudna modulisanost clock signala pri spektralnoj analizi vidi na sličan način, odnosno kao parazitski signal postavljen simetrično oko noseće frekvencije te da ignorisanje ove činjenice ponekad može dovesti do pogrešnih zaključaka; pri spektralnoj analizi amplitudna i frekvencijska modulacija istog spektralnog sastava se mogu razlikovati na osnovu činjenice da su im donji sidebandovi u protivfazi, kao i na osnovu činjenice da nivo artifakta odnosno sidebandova za isti nivo FM, odnosno jittera, raste sa slopeom signala odnosno, kad govorimo o steady state signalima, sa frekvencijom modulisanog signala (6dB/okt), dok je kod AM konstantan.



Slika 5:

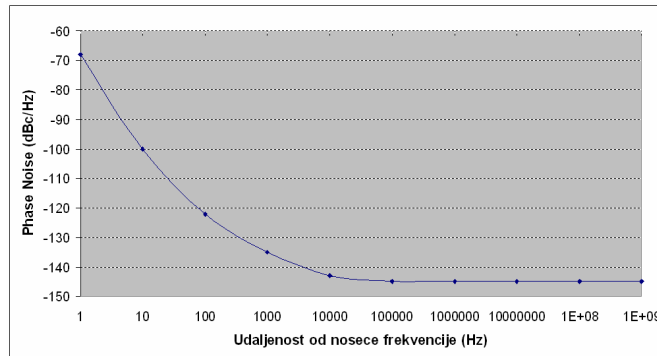
DIR1703, spektralna analiza (phase noise)  
MCK linije u opsegu  $\pm 50$ kHz



Slika 6:

DIR1703, spektralna analiza (phase noise)  
MCK linije u opsegu  $\pm 500$ Hz

Pošto se jitterom proizvedeni artifakti nalaze simetrično sa obe strane noseće frekvencije, odnosno u potpunosti su referisane u odnosu na nju, jitter clock signala se osim klasičnom spektralnom analizom može predstaviti i spektralnom analizom samog (demodulisanog) parazitskog signala, pri čemu noseća frekvencija postaje nulta tačka x ose dijagrama a parazitski signal tj. jitter je prikazan kao energija šuma na određenoj udaljenosti od nje. Ova vrsta grafikona se najčešće koristi za prikazivanje intrinzičnog jittera samih oscilatora, obzirom da je kod njih uglavnom karakterističan niskofrekvencijski (1/f) jitter. SONET (Synchronous Optical Network) standard, ipak, za oscilatore propisuje specifikovanje jittera samo unutar definisanog frekvencijskog raspona i to 12kHz-20MHz tako da najveći deo RMS vrednosti jittera može ostati van ovako specifikovanih performansi. Osim samih oscilatora i napajanja, zbog karakterističnog spektra većine naponskih referenci, često proizvode upravo jitter ovakvog ili sličnog spektralnog sastava.



Slika 7: Tipičan phase noise diagram „low jitter“ integrisanih oscilatora

Iako postoje formule kojima se uspostavljaju relacije između (time domain) jittera i phase noise podataka [3], ukupna vrednost jittera je i dalje najvidljivija iz osnovne analize clock signala u domenu vremena a njegov spektralni sastav tek iz phase noise dijagrama. Za pouzdane zaključke najčešće je potrebno imati obe vrste uvida.

Kada su oscilatori i specifikovanje jittera u pitanju, osim na frekvencijski raspon na koji se podatak odnosi, kao i prethodno pomenutu razliku između peak-to-peak i RMS vrednosti, treba obratiti pažnju i na to da postoji razlika između „period“ jittera (iznos kolebanja u odnosu na idealan interval) i „cycle-to-cycle“ jittera (iznos varijacija između uzastopnih intervala, dat za određenu dužinu uzorka).

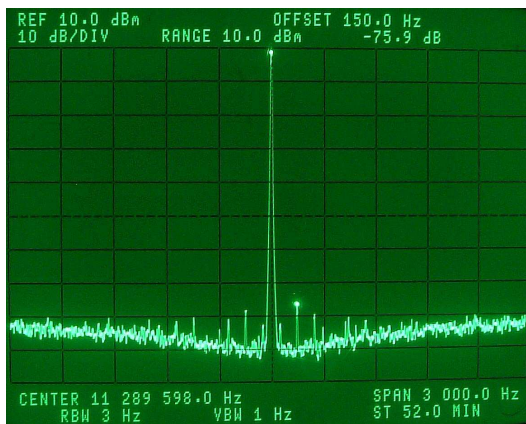
Ponekad navođene PPM (parts per million) tolerancije oscilatora se odnose na apsolutno (long term) odstupanje od specifikovane frekvencije i nemaju nikakve veze sa jitterom, osim što se u određenom smislu mogu interpretirati kao njegova DC komponenta; „određenom“ jer postoje i definicije jittera po kojima se istim smatraju isključivo vremenske neodređenosti frekvencija iznad 10Hz. Kako god, jedina moguća posledica greške u apsolutnoj frekvenciji u audiu je pogrešan pitch, pri čemu su u ovom smislu sasvim zadovoljavajuće već najslabije performanse koje su danas uopšte u opticaju (100PPM, odnosno 0.01%), tako da PPM tolerancije oscilatora, iako u nekim primenama veoma važne, spadaju u parametre koje nemaju nikakve veze sa njihovom primenom u audiu.

## ***J-signal***

Fenomen data related jittera uslovio je potrebu za signalima kojima bi se kontrolisano mogao meriti jitter u prisustvu audio signala, odnosno signala na DATA liniji (u slučaju upotrebe danas preovlađujućeg „2's complement“ formata podataka jedno podrazumeva drugo), za razliku od jittera u situaciji „digitalne tišine“ odnosno odsustva signala na DATA liniji. Potrebu za kontrolisanim merenjima ove vrste je dodatno usloвила i

upotreba Biphase Mark (Manchester) Codinga kao sistema kodiranja za S/PDIF i AES/EBU, dugo godina praktično isključivo korišćenih i u digitalnom audio još uvek dominirajućih eksternih interfacea, a koji podrazumeva integrisanje clock signala u same podatke. Rezultat ovoga je da, ukoliko se ovom problemu posebno ne posveti pažnja, jitter koji se javi u S/PDIF interfaceu nakon dekodiranja postaje data related jitter, a što dalje znači da rezultati testiranja jittera sistema koji koristi ovakav interface ne bi bili relevantni ukoliko bi bili obavljani u situaciji digitalne tišine.

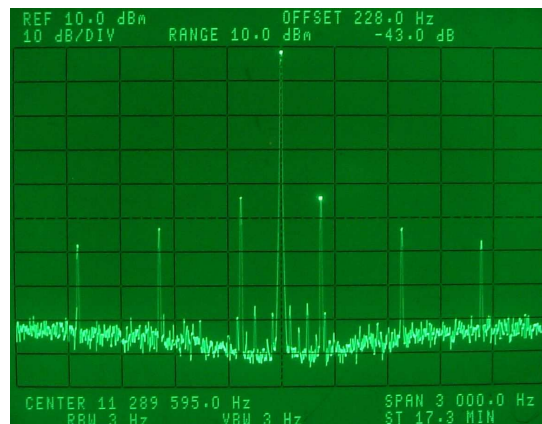
Iz ovih razloga jedan od najvećih umova digitalnog audia, prerano preminuli Julian Dunn (Prism, Audio Precision, Nanophon) je razvio J-signal. Ovaj signal kontrolisano menja stanje LSB-a (Least Significant Bit). Ukoliko se pri analizi signala pojavljuju artefakti koji su u relaciji sa frekvencijom kojom se menja LSB onda oni jesu data related jitter artefakti. Na slikama 8 i 9 može se videti način na koji J-signal modifikuje master clock liniju S/PDIF receivera CS8412. (Kasnije verzije Crystalovih receivera dekodiraju clock u odnosu na „preamble“, odnosno deo S/PDIF framea koji nije u relaciji sa audio podacima tako da u ovom smislu imaju drugačije performanse.)



Slika 8:

CS8412, spektralna analiza (phase noise)  
MCK linije u uslovima digitalne tišine,  
opseg  $\pm 1.5\text{kHz}$

(napomena: slika 2 takođe prikazuje MCK CS8412)



Slika 9:

CS8412, spektralna analiza (phase noise)  
MCK linije u prisustvu signala (J-signal),  
opseg  $\pm 1.5\text{kHz}$

## *Posledice jittera*

Svi grafikoni prikazani u prethodnom delu teksta prikazuju probleme vezane za jitter direktnom analizom clock linija, odnosno prikazuju jitter u njegovom „izvornom“ domenu. U tom smislu dva poslednja grafikona su zapravo „netipična“ za J-signal: J-signal, iako sasvim upotrebljiv i veoma koristan na upravo prikazan način, originalno nije bio razvijan u kontekstu direktne analize clock signala već analize signala koji u krajnjem i jeste važan, odnosno bio je namenjen analizi analognog izlaznog signala digitalnog izvora. Drugim rečima namera koja je stajala iza ovoga podrazumevala je ideju da se



jitter u potpunosti meri „spolja“, merenjem njegovih posledica i to analizom isključivo audio opsega. Takva upotreba J-testa se i jeste negde od sredine devedesetih nametnula kao standardni način merenja jittera u testovima Stereophilea i HiFi Choicea. Pojava ove vrste merenja bila je moguća zahvaljujući tome što je do tada u ogromnoj meri bio odrađen još jedan posao: dijagnostifikovani su i opisani načini na koji jitter degradira konverziju digitalnog signala u analogni.

Ovaj posao je naravno bio ključni deo posla razumevanja jittera u audio; umesto prethodnog mitskog predstavljanja jittera kao nedodirljivog/neuhvatljivog, ponekad čak i nemerljivog, praktično natprirodnog ali presudnog problema dobrog zvuka sa digitalnih medija <sup>2)</sup>, pri čemu je za ovakvu kombinaciju misli kao i uvek, naravno, po pravilu bilo odgovorno nerazumevanje stvari, postavljena je teorija kojom je bilo moguće pristupati jitteru kroz njegove konkretne manifestacije (a ne poetske ili metafizičke atribucije...). U tom smislu su pre svega važni radovi nekolicine autora publikovani tokom devedestih, na prvom mestu maločas pomenutog Juliana Dunna (pogledati reference na kraju teksta).

Dakle, na koji način jitter moduliše audio signal?

Mada postoje mehanizmi zbog kojih je bitan jitter svih clock linija pa i jitter Data linije, za osnovno razmatranje je dovoljno reći da je za rezultujući audio signal bitan clock signal, odnosno jitter clock signala koji triggeruje izlaz D/A konvertera. Jitter ovog clock signala dakle rezultuje u triggerovanju izlaza D/A konvertera u neravnomernim vremenskim intervalima. To dalje znači da je, na sličan način kao i pri direktnoj analizi clock signala, posledica jittera frekvencijska modulacija audio signala, pri čemu se i ovde generalno mogu razdvojiti načini na koje se manifestuju random jitter i determinisani jitter; prvi se manifestuje kao wideband šum, drugi u obliku diskretnih artifakata, odnosno neharmoničkih nelinearnih izobličenja gde je frekvencija jednog tona (originalni audio ton) modulirana drugim (frekvencija jittera), i gde su artifakti sidebandovi oko osnovnog (modulisanog) tona. (Ovde se ponovo može staviti napomena da i na ovom mestu postoji potreba za razlikovanjem frekvencijske od amplitudne modulacije.)

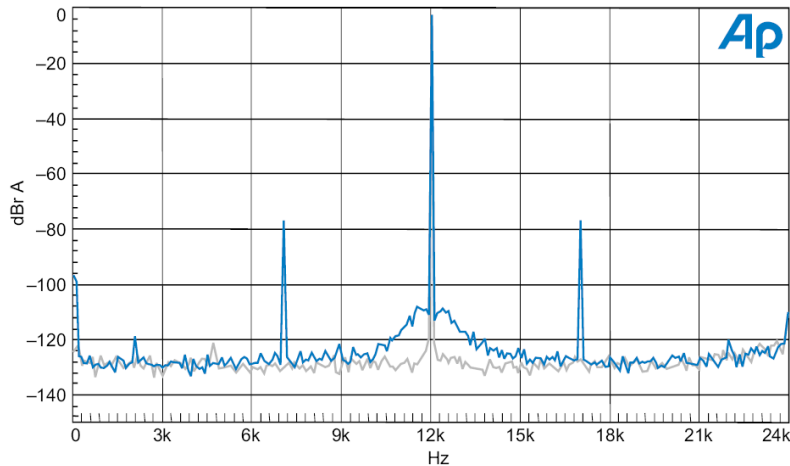
Prethodno rečeno znači to da jitter frekvencije recimo 100Hz uvek proizvodi sidebandove udaljene 100Hz od osnovnog audio signala, bez obzira na frekvenciju samog audio signala, odnosno bez obzira na to da li je audio signal frekvencije 1kHz ili 10kHz. Ipak, nivo ovih sidebandova je pri datom jitteru različit za različite frekvencije audio signala i raste 6dB (2 puta) po oktavi (20dB tj. 10 puta po dekadi); isti iznos jittera na audio signalu frekvencije 10kHz proizvodi sidebandove 20dB veće amplitude nego na audio signalu frekvencije 1kHz. Maločas pomenuti Julian Dunn dao je formulu kojom dovodi u vezu ove tri veličine:  $R_j = 20 \cdot \log(\omega_i \cdot J/4)$ , gde je  $R_j$  amplituda jitterom proizvedenih artifakata referisana u dB u odnosu na modulirani audio signal,  $\omega_i$  frekvencija modulisanog audio signala, a  $J$  vrednost jittera. Zbog činjenice da za dati nivo jittera

---

2) Osim zbog tehničkih fenomenoloških sličnosti, jitter je i na ovaj način zadobio status sličan onom koji su par decinija ranije u slučaju pojačala odnosno pojačavačkih kola sa povratnom vezom imala TIM tj. SID izobličenja.

artifakti rastu sa frekvencijom modulisanog signala, J-signal osim već pomenutog LSB signala niske frekvencije (standardno  $F_s/192$ ) uključuje i signal visoke audio frekvencije a čija se modulisanost posmatra, i to signala frekvencije  $F_s/4$  i nivoa 50%FS (-3dBFS). Iz istog razloga se u slučaju u kome data related jitter nije od značaja za merenja jitera može koristiti i čisti sinusni signal visoke frekvencije, pri čemu je opet iz nekoliko razloga najbolje koristiti  $F_s/4$  frekvenciju.

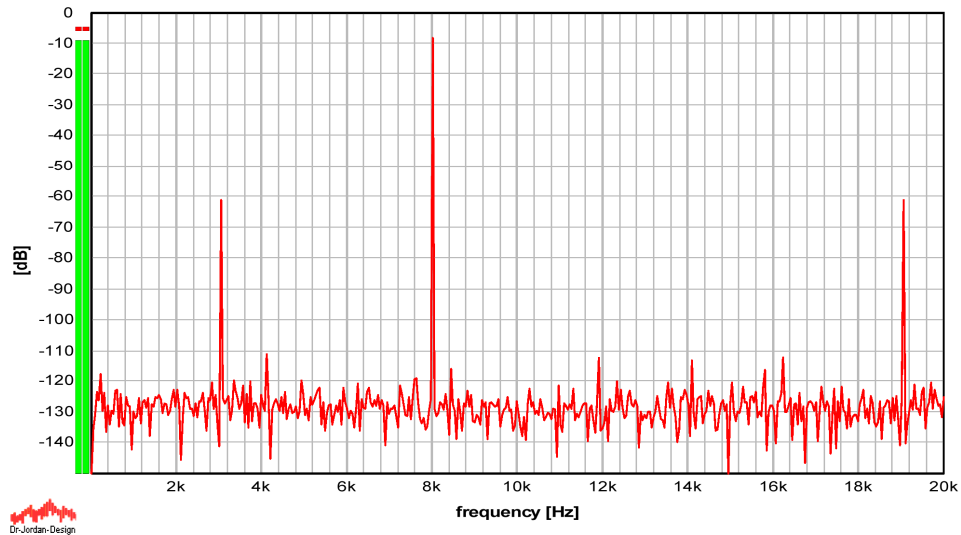
Plava kriva na slici 10 prikazuje slučaj u kome je signal frekvencije  $F_s/4$  (ovde 12kHz, za  $F_s=48\text{kHz}$ ) modulisan sinusoidalnim jitterom frekvencije 5kHz i vrednosti 3.5ns RMS. Može se videti da su rezultat dva sidebanda, 5kHz udaljena od modulisanog tona. Osim sinusoidalne komponente, na istoj krivi se oko osnovne frekvencije počev na nivou od oko -110dB može uočiti „suknja”, takođe uzrokovana jitterom. Uzroci ovakvih artifakata po pravilu su u vezi sa samim oscilatorima, bilo da su u pitanju klasični bilo PLL oscilatori (uporediti ovaj oblik sa onim na slici 7).



Slika 10: Signal frekvencije 12kHz (ovde  $F_s/4$ ) modulisan sinusoidalnim jitterom frekvencije 5kHz i vrednosti 3.5ns RMS

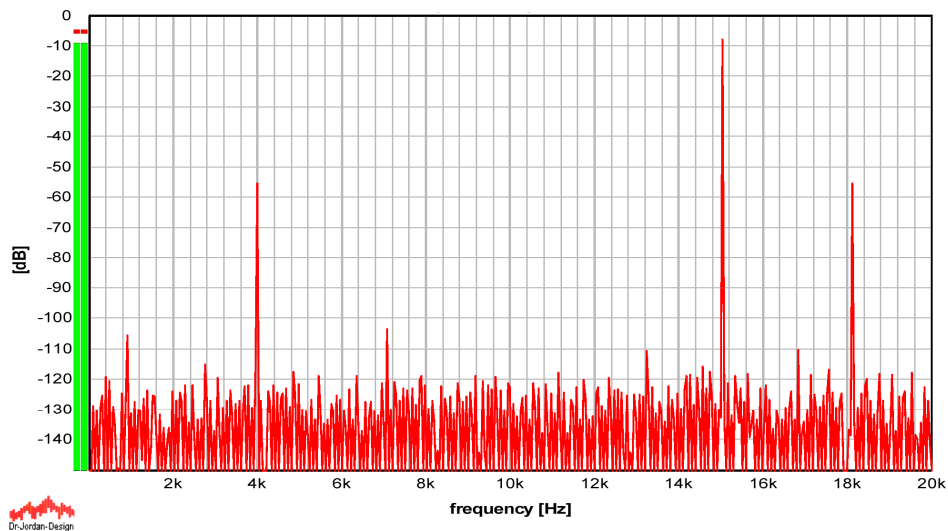
Način na koji jitter produkuje izobličenja je iz prethodno izloženog jasan za slučaj u kome je frekvencija jittera manja od frekvencije modulisanog audio signala: sidebandovi su simetrično postavljeni u odnosu na modulisani signal i unutar su audio opsega. Za potrebe testiranja razmatranje ovakvog slučaj je sasvim dovoljno. Ipak, u stvarnosti ovo opisuje tek deo fenomena. Šta se dešava kada jitter ima veću frekvenciju od modulisanog signala, gde se nalazi levi sideband? Ili, gde se nalazi desni sideband ukoliko su frekvencija modulisanog signala i jittera u zbiru iznad prenosnog opsega digitalnog sistema, odnosno Nyquistovog limita ( $F_s/2$ )? I dalje, šta sa jitterom koji sam ima frekvenciju višu od frekvencije Nyquistovog limita? Odgovor na ovo pitanje glasi da postoji mehanizam kojim se sidebandovi proizvedeni determinisanim jitterom a koji bi na osnovu elementarne kalkulacije bili van („ispod“ ili iznad) prenosnog opsega mirroruju unutar njega. Ukoliko je frekvencija jittera viša od frekvencije modulisanog signala, levi

sideband će biti mirrorovan u odnosu na DC tačku. Na slici 11 prikazan je signal 8kHz modulisan frekvencijom 11025Hz. Levi sideband je na 3025Hz dok se desni, očekivano, nalazi na 19025Hz.



Slika 11: Signal 8kHz modulisan jitterom frekvencije 11025Hz

Ukoliko desni sideband dospeva van prenosnog opsega, isti će biti mirrorovan u odnosu na frekvenciju samplinga, odnosno biće postavljen u odnosu na frekvenciju koja je jednaka razlici frekvencija samplinga i frekvencije modulisanog audio signala. Levi sideband je na očekivanih 3975Hz dok je desni na 18075Hz ((44100-15000)-11025Hz).



Slika 12: Signal 15kHz modulisan jitterom frekvencije 11025Hz

Na osnovu ovoga može se zaključiti da frekvencija (over)samplinga može uticati na distribuciju određenih jitterom proizvedenih artifakata. U tekstu Benjamina i Gannona (Dolby Labs) prikazana je situacija u kojoj je audio signal frekvencije 20kHz modulisan jitterom frekvencije 16kHz i gde se levi sideband nalazi na očekivanih 4kHz dok je desni umesto na 36kHz mirrorovan na 12kHz, autori ovo nisu saopštili ali se iz izloženog principa može zaključiti da se radi o sistemu sa samplingom od 48kHz. [11]

Ovo pravilo distribuiranja sidebandova važi i ukoliko je frekvencija jittera viša od frekvencije Nyquistovog limita ( $F_s/2$ ). Jedan sideband je mirrorovan oko DC tačke a drugi je definisan sampling frekvencijom i postoji kao sideband frekvencije koja je jednaka razlici sampling frekvencije i frekvencije modulisanog signala. U tekstu [7] može se pronaći drugačija formulacija istog principa prema kojoj su sidebandovi u ovom slučaju postavljeni oko frekvencije koja je jednaka razlici frekvencija Nyquistovog limita i frekvencije modulisanog audio signala, a međusobna udaljenost sidebandova je definisana razlikom frekvencije jittera i frekvencije Nyquistovog limita.

Šta ukoliko je frekvencija jittera viša i od frekvencije samplinga? Zanimljivo je da je Rémy Fourré (UltraAnalog) tvrdio da multibitni konverteri jednostavno ignorišu jitter frekvencija viših od frekvencije samplinga. [6] Upravo citirani Dan Lavry, nasuprot tome, smatra da jitter frekvencije 1kHz iznad frekvencije samplinga ima potpuno iste posledice kao i jitter frekvencije 1kHz. [7]

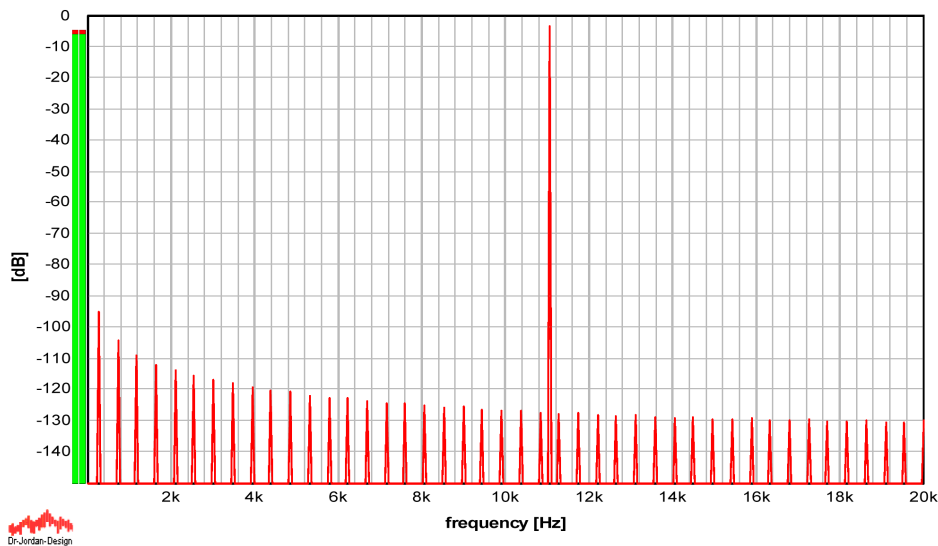
Treba reći da je jitter viših frekvencija, iako daleko od toga da bi mogao biti ignosrisan, ipak u praksi nižih nivoa nego onaj nižih frekvencija. Razlozi za ovo nalaze se kako u strukturi intrinzičnog jittera, odnosno šuma, oscilatora i napajanja, tako i u sposobnosti PLLa da jitter viših atenuira daleko bolje i lakše nego jitter nižih frekvencija.

## ***Još malo o data related jitteru***

Data related jitter može biti posledica upotrebe protokola koji integrišu clock signal u podatke (Biphase Mark Coding korišćen kod S/PDIF-a) ili recimo preslušavanja između CLK i DATA linija. [10]

Kada su u pitanju posledice jittera u analognom signalu, data related jitter, znači jitter frekvencije jednake frekvenciji modulisanog signala je još jedan specifičan slučaj jer postavlja pitanje manifestovanja sideband(ov)a s leve strane modulisanog signala. Da li (prvi) levi sideband treba očekivati na DC „frekvenciji“ (DC offset)? Šta sa ostalim sidebandovima s leve strane? Da li i mirrorovani mogu biti bilo šta osim harmoničkih komponenti i ako ne, po čemu se posledice ovakvog jittera u analizi mogu razlikovati od klasičnog harmoničkog izobličenja (u ovom slučaju izobličenja parnih harmonika)? Pre svega po tome što, kao što je rečeno, nivo ovih artifakata raste potpuno proporcionalno sa frekvencijom modulisanog signala, zatim na osnovu toga što je odnos između amplituda modulisanog tona i artifakta uvek isti za bilo koji nivo modulisanog tona, i najzad po činjenici da data related jitter čini noise floor nervoznijim. [7]

Govoreći ponovo o data related jitteru, jedna napomena u vezi upotrebe J-signalu. Njegov spektralni sastav izgleda kao na slici 12. Komponenta  $F_s/192$  (229.6875Hz za  $F_s=44.1\text{kHz}$ ) nivoa 1 LSB izabrana je zbog maksimalnog efekta uzrokovanja data related jittera u odnosu na njeno stvarno učešće u audio signalu, a komponenta  $F_s/4$  (11025Hz) zbog maksimalnog nivoa artifakata za dati jitter, odnosno kao najviša „neproblematična“ steady state frekvencija. U idealnom slučaju, slučaju odsustva jittera, nikakvi dodatni artifakti se ne bi pojavili a postojeće komponente (harmonici) signala 229.6875Hz bi ostale na prikazanom tj. intrinzičnom nivou. Podložnost sistema data related jitteru manifestuje se kao povećan nivo ovih komponenti, i to sideband parova oko osnovne frekvencije 11025Hz, a na udaljenosti koja odgovara frekvencijama neparnih harmonika frekvencije 229.6875Hz (10795.3/11254.7Hz, 10565.6/11484.4Hz itd).



Slika 13: Spektralna analiza samog J-signalu

## *Oversampling i jitter*

Što se tiče odnosa jittera i oversamplinga, suprotno onome što se ponekad misli, oversampling kao (matematička) tehnika po sebi niti potiskuje niti doprinosi ukupnom nivou jittera (intrinzični jitter oversampling filtera bi bio, naravno, druga tema). U tom smislu determinisani jitter clock Inija ima potpuno iste posledice, bilo da oversampling jeste ili nije korišćen, s tim što treba uočiti specifičan način distribuiranja desnog sidebanda u slučaju u kome isti dospeva iznad audio opsega. Kada je u pitanju wideband jitter, oversampling, iako i dalje ne utiče na ukupan nivo jittera, utiče na način na koji se wideband jitter distribuira u wideband šum (noise floor) nakon D/A konverzije i to tako što noise floor čini širim po spektralnom sastavu (onoliko puta koliki je oversampling primenjen, znači 4 puta za 4x oversampling) ali nižim po amplitudi (6dB za 4x oversampling). Tek iz ove činjenice a uzimajući u obzir maskirajući efekat noise floora (pogledati str. 15, prvi pasus) može se izvesti zaključak da je (pretpostavljeno isti) reproduktivni sistem manje osetljiv na jitter kada oversampling nije upotrebljen.

## ***Da li je jitter izmeren na audio izlazu uvek isti kao jitter clock linije? Delta/sigma konverteri***

Sva prethodna razmatranja jitterom uzrokovanih izobličenja podrazumevaju klasičnu multibitnu arhitekturu D/A konvertera (ponekad poistovećivanu sa R2R arhitekturom). Delta/sigma konvertere karakteriše još nekoliko mehanizama koji određuju posledice jittera u audio signalu i među kojima je dominantan fenomen taj da jitter moduliše njihov noise floor. Na taj način može se reći da su oni generalno osetljiviji na jitter ali će opis ovih mehanizama biti ostavljen za neku drugu priliku. Jedan od važnijih razloga zbog kojih D/A konverteri poslednjih generacija imaju hibridnu arhitekturu (multi-, obično 5-bitnu delta/sigma) jeste upravo potreba za manjom osetljivošću na clock jitter.

Prethodno izrečena tvrdnja sugeriše dalje da jitter clock signala koji kontroliše izlaz D/A konverter chipa ipak ne mora nužno i jednoznačno da određuje i krajnji nivo jitterom uzrokovanih izobličenja u audio signalu i u prilog ovoj tvrdnji može se dodati i to da na njihov nivo utiče i inherentni jitter samih D/A chipova kao i, sa druge strane, njihova moguća sposobnost potiskivanja clock jittera. Osim toga, na rezultat dobijen merenjem rezultujućeg audio signala utiču i moguće nelinearnosti analognog izlaznog stepena kao i moguće nelinearnosti u radu D/A konvertera uzrokovane izlaznim stepenom. Iako ovaj poslednji problem vezan za izlazni stepen poziva na oprez pri tumačenju rezultata, ove uslovljenosti ipak ne znače da su merenja jittera ove vrste beskorisna, naprotiv.

## ***Da li se jitter čuje?***

U osnovi, potrebno je razlučiti tri stvari vezane za jitter:

1. njegovo dijagnostifikovanje tj. merenje na clock liniji/linijama digitalnog uređaja;
2. način (oblik) na koji dospeva na audio izlaz;
3. njegovu čujnost.

U prethodnom delu teksta skicirali smo fenomene vezane za prve dve stavke. Ipak, kao što je primetio Dunn, jedno je dijagnostifikovati i izmeriti jitter, pitanje koliko sme da ga bude i kada ga je previše je drugo pitanje. Neke dve decenije nakon otkrića jittera u audio teoriji postoji saglasnost oko toga da jitter jeste problem vredan ozbiljnog istraživanja i razmatranja, kao i oko toga da treba nastojati da on bude što manji. Međutim, saglasnost oko toga šta je dozvoljen nivo nije ni izbliza tako visoka i u praksi postoji tek oko manjeg broja za njega vezanih fenomena.

Jedna od njih ticala bi se toga da zahtev za niskim jitterom raste sa povećanjem rezolucije (broja bitova) formata u domenu amplitude (veća rezolucija, odnosno broj bitova podrazumeva strožije zahteve u vezi jittera) i s tim u vezi danas je sasvim uobičajeno da se o važnosti tj. čujnosti jittera govori obzrom na rezoluciju digitalnog sistema.

Drugi fenomen jittera oko koga postoji relativna saglasnost po pitanju čujnosti jeste njegov spektralni sastav i prema njoj wideband jitter je manje problematičan od determinisanog jittera. Autor ovog teksta bi spadao među radikalnije zagovornike ovakvog razumevanja čujnosti jittera, smatrajući da wideband jitter ne samo da je benignan već da u određenoj meri, zbog sopstvene benignosti s jedne i efekta maskiranja diskretnih artifakata sa druge strane, može da bude i dobrodošao. (Zapravo, ideja tj. tumačenje po kome su wideband šum i slično strukturirani artifakti, za razliku od diskretnih, relativno benigni postoji na generalnijem nivou i starije je i od samog otkrića jittera.)

Određen nivo saglasnosti postoji i oko toga da je data related jitter problematičniji od ostalih oblika diskretnog jittera. Ova tvrdnja može biti na prvi pogled problematična ukoliko se ima u vidu da data related jitter proizvodi artefakte koji su parni harmonici modulisanog signala a za koje postoji tradicionalno uverenje da su za uvo prijatni.<sup>3)</sup> Ipak, simulacija ove vrste jittera koja se može pronaći u tekstu Dana Lavryija [7, str. 4] prikazuje da ova vrsta jittera osim harmoničkih proizvodi i mnoštvo dodatnih artifakata. Ista simulacija pokazuje i to da ni po uzusima ove teorije parnih i neparnih harmonika i bez ovih dodatnih artifakata data related jitter ne mora biti prijatan jer ista teorija ponekad specifikuje da su samo parni harmonici nižeg reda benigni dok se u ovom slučaju isti relativno konzistentno protežu preko celog opsega.

Iako su publikovana istraživanja koja su ciljala na konkretno određivanje kritičnih nivoa jittera, uključujući i specifikovanje čujnosti obzirom na njegovu frekvenciju [4, 5, 11] i specifikovanje obzirom na vrstu [12], i iako postoje autori koji nastoje da dovedu u vezu konkretne spektralne komponente jittera sa konkretnim subjektivnim posledicama (Paul Miller, Guido Tent), konsenzusa po ovim pitanjima ipak nema.

Nema ga, nažalost, ni kada se radi o mestu i stvarnom značaju jittera u digitalnom audiu. Digitalni audio svet je u svojoj istoriji u odnosu na jitter prevalio pun krug, od vremena u kome je bio smatran savršenim a u kome za jitter nije ni znao, do toga da jitteru pripisuje početak i kraj svojih problema, i zatim do odlaganja jittera na otpad kao tehničkog parametra koji u audiu nema praktičnog značaja. Istina je verovatno u tome da pitanje jittera jeste samo jedno od pitanja digitalnog audia i da, kao i obično, isto nije pametno sasvim ignorisati ali da postoje mnogi drugi fenomeni koji određuju krajni rezultat, od kojih neki, moguće, još uvek nisu ni otkriveni.

---

<sup>3)</sup> Prema njemu, za razliku od neparnih harmonika, naročito onih višeg reda, parni harmonici (nižeg reda) nisu problematični i mogu biti čak i prijatni; autor ovog teksta se inače ne slaže sa ovom podelom.

---

Copyright © 2006, 2007 Audial d.o.o. Beograd. Sva prava zadržana. Korišćenje materijala iz ovog teksta bilo u delovima ili celini, kao i njegovo umnožavanje i distribucija bilo koje vrste je dozvoljeno isključivo uz pisanu saglasnost.

Slike 2, 3, 5, 6, 8, 9: Copyright © 2006 John Westlake (Lakewest, Cambridge, Pink Triangle). Korišćeno uz dozvolu autora.

Slika 10: Copyright © 2000 Jullian Dunn, Audio Precision, Inc.; Published by Audio Precision, <http://ap.com> . Korišćeno uz dozvolu izdavača.

---

Reference:

[1] „Jitter Measurements for CLK Generators or Synthesizers“, Maxim Integrated Products, Inc., 2003.

<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN2744.pdf>

[2] „An Introduction to Jitter in Communications Systems“, Maxim Integrated Products, Inc., 2003.

<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1916.pdf>

[3] „Clock (CLK) Jitter and Phase Noise Conversion“, Maxim Integrated Products, Inc., 2004.

<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3359.pdf>

[4] Audio Precision site između ostalog nudi nekoliko fundamentalnih dela na temu jittera. Prethodni radovi Julliana Dunna za Audio Precision su uglavnom uključeni u knjigu Measurement Techniques for Digital Audio koja se takođe može downloadovati sa AP sitea. Za download je potrebna (besplatna) registracija.

<http://ap.com/index.php?page=support&id=1000001024>

[5] Jullian Dunn je kao konsultant stajao iza nekoliko etiketa a iza Nanophona je stajao i kao vlasnik. Na siteu se mogu pronaći neki od najvažnijih tekstova o jitteru iz 90-ih.

<http://www.nanophon.com/audio/>

[6] Rémy Fourré, „Jitter & the Digital Interface“, Sterophile Vol.16 No.10, 1993.

<http://stereophile.com/reference/1093jitter/>

[7] Dan Lavry, „On Jitter“, Lavry Engineering, 1997.

[http://www.lavryengineering.com/white\\_papers/jitter.pdf](http://www.lavryengineering.com/white_papers/jitter.pdf)

[8] Mike Story, „Timing Errors and Jitter“, dCS Limited, 1998.

[http://www.dcsLtd.co.uk/technical\\_papers/jitter.pdf](http://www.dcsLtd.co.uk/technical_papers/jitter.pdf)



[9] Arnold B. Krueger, „What is Jitter or FM Distortion?“, The PC AV Tech, 1998-2002.  
<http://www.pcavtech.com/soundcards/techtalk/FM/>

[10] „Effects of Digital Crosstalk in Data Converters“, Maxim Integrated Products, Inc., 2002.

<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1761.pdf>

<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1841.pdf>

<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1842.pdf>

[11] Eric Benjamin and Benjamin Gannon, “Theoretical and Audible Effects of Jitter on Digital Audio Quality”, Dolby Laboratories, 1998.

[12] Morgan Hirosuke Miki, Yoshihiro Ohtani, John Kowalski, „Jitter Requirements“, Sharp Corporation, 2004.

<http://www.ieee802.org/11/DocFiles/04/11-04-1458-00-000n-jitter-requirements.ppt>

[13] Bruno Putzeys, Renaud de Saint Moulin, "Effects of Jitter on AD/DA conversion. Specification of Clock Jitter Performance.", AES 116th Convention, Berlin, Germany, 2004 May 8–11

<http://www.grimmaudio.com/whitepapers/clock%20jitter%20spec.pdf>

[14] Chris Travis, Paul Lesso, "Specifying the Jitter Performance of Audio Components", AES 117th Convention, San Francisco, CA, USA, 2004 October 28–31

[http://www.wolfsonmicro.com/uploads/documents/en/Specifying\\_Jitter\\_Performance.pdf](http://www.wolfsonmicro.com/uploads/documents/en/Specifying_Jitter_Performance.pdf)