

4

Il Jitter, questo sconosciuto

(L'araba fenice) ...che ci sia ognun lo dice, dove sia nessun lo sa!

Per **jitter** si intende il fenomeno della irregolarità del clock in un segnale digitale. È facile intuire che poiché in natura non esistono parametri “stabili” qualunque segnale digitale è affetto da *jitter* (così come qualunque segnale analogico è affetto da rumore). Il problema che interessa all’audiofilo è se, e quanto, questo fenomeno interessi il suono. A complicare la questione vi è l’abitudine comune a molti di dare il nome di *jitter* a molti altri fenomeni che con questo non c’entrano nulla (forse perché nel torbido si pesca meglio). Si trova questo termine usato a proposito dei problemi di estrazione dei dati audio da un supporto digitale (i problemi ci sono e molti ma il *jitter* c’entra ben poco visto che **NON** c’è il passaggio all’analogico); spesso, infine, si dà impropriamente il nome di *jitter* a tutti i problemi di deterioramento della forma d’onda lungo una linea di trasmissione, di questo ne parleremo nel corso della lezione.

In questa lezione intendo riassumere gli aspetti teorici del **jitter**, discuterne i possibili effetti e mostrare il risultato di alcuni esperimenti effettuati con l’uso massiccio delle capacità di elaborazione di un moderno PC.

Influenza del jitter sulla conversione D/A e A/D

Avevamo visto in una delle puntate precedenti come è strutturato il processo di conversione digitale-analogico, studiamo adesso quale può essere l'influenza di una alterazione della base dei tempi.

Consideriamo una funzione $f(t)$ che dovrebbe essere valutata in un istante t_0 , se la si valuta invece nel punto $t_0 + \delta$ si ottiene il valore $f(t_0 + \delta)$ con un errore $f(t_0 + \delta) - f(t)$ che può essere approssimato con $\delta f'(t_0)$, dove $f'(t)$ è la derivata prima di $f(t)$.

Se

$$f(t) = a \sin(2\pi\nu t + \phi)$$

è una funzione sinusoidale di frequenza ν , la sua derivata vale

$$2\pi\nu a \cos(2\pi\nu t + \phi)$$

e si può dimostrare che

- l'errore commesso alterando la base dei tempi è proporzionale alla frequenza ν . Questa è una grossa fortuna perché i segnali musicali hanno un ridotto contenuto di alte frequenze.
- l'errore è proporzionale alla intensità del segnale buono. Questa è una grossissima fortuna perché a differenza dei rumori di livello costante (il ronzio di rete, il fruscio del vinile, delle valvole, dei pre-pre) quando il segnale diminuisce di intensità, il rumore dovuto al *jitter* segue la stessa sorte, in assenza di segnale il *jitter* non produce effetto alcuno. È probabile quindi che il rumore dovuto al *jitter* venga mascherato dal segnale che lo ha generato

Certamente però non ha senso considerare un singolo errore di temporizzazione (che tra l'altro non avrebbe effetti apprezzabili). Se si immagina che l'errore sia ripetuto bisogna distinguere varie possibilità

- l'errore è **sistematico** ovvero il clock va ad una frequenza diversa dalla nominale, questo altera il pitch del suono ma sfido qualunque musicista a distinguere un clock a **44100.001 Hz** da uno a **44100 Hz**.
- l'errore è **casuale** con una opportuna distribuzione statistica. In questo caso l'effetto sul segnale analogico convertito consiste nella iniezione di un rumore casuale scorrelato con un livello che dipende dall'intensità e dalla distribuzione statistica del *jitter* e dalla frequenza del segnale musicale. Questo scenario è praticamente certo, come ogni altra grandezza fisica presente in natura la frequenza del clock non può essere costante ma presenta un rumore casuale. L'ordine di grandezza di questo errore è legato alla qualità della costruzione e quindi certamente al costo dell'apparecchio (**N.B.** per ottenere un ottimo clock bisogna spendere, non è invece scontato che spendendo molto si ottenga un buon clock).
- l'errore è **correlato** col segnale oppure con un disturbo esterno (per esempio i **50Hz** di rete). In questo caso l'effetto consiste in una modulazione di frequenza del segnale musicale. Questo scenario è certamente possibile. Lo possiamo classificare come un problema della famiglia delle interazioni deboli, di natura insidiosa e subdola e, in linea di principio, dipendente non solo dal livello di costruzione dell'apparecchio ma anche dalla sua installazione, dalle apparecchiature vicine, dalla rete di alimentazione, etc.

Tipicamente sono presenti tutti e tre i tipi di errore ma vale la pena di studiarli separatamente.

Di solito se ne parla poco ma il problema del *jitter* sussiste anche al momento della conversione **A/D**: eventuali errori sul clock al momento della conversione si ripercuotono sul processo di digitalizzazione, memorizzando un segnale sporcato. Anche in questo caso gli effetti sono gli stessi, il fenomeno, in genere, è trascurato per due ragioni:

- di solito le incisioni vengono effettuate con apparecchiature di alta qualità;
- in ogni caso una volta fatto il danno non vi sono rimedi possibili.

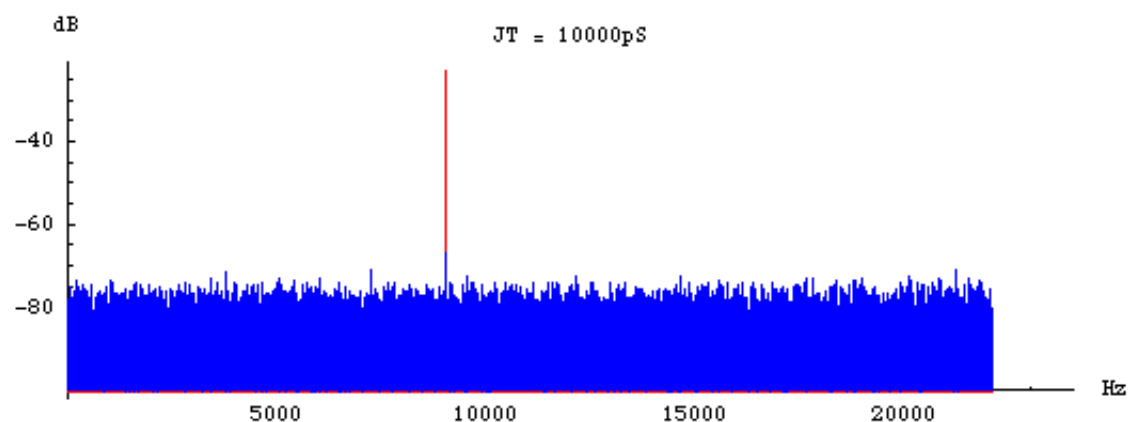
Nel mondo analogico lo stesso tipo inconveniente si verifica quando le fluttuazioni di velocità del tornio incisore vengono immortalate sul vinile.

Recentemente sono stati prodotti CD “speciali” in cui, tra l’altro è ottimizzata la stabilità del clock della conversione **A/D**.

Simulazioni matematiche

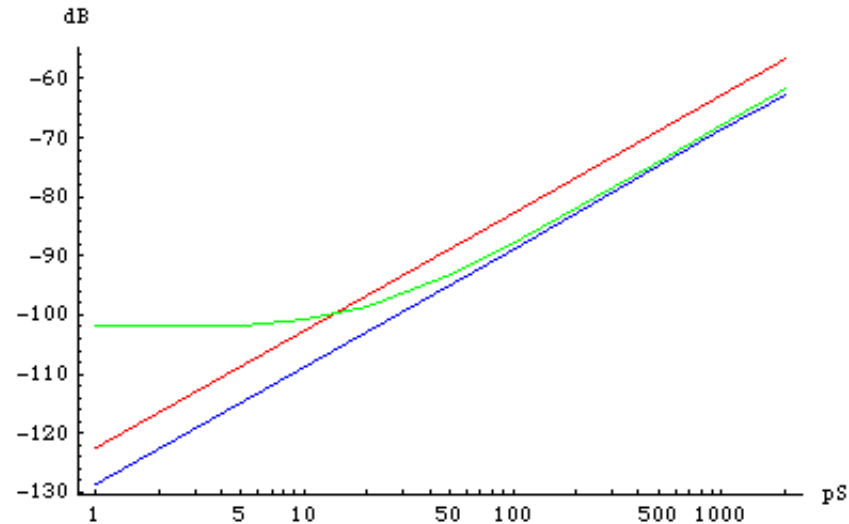
Questi fenomeni possono essere studiati bene per via puramente matematica, facendo delle “semplici” simulazioni. Le seguenti figure sono state ottenute generando ed analizzando sequenze di circa un secondo di segnale campionato a 44100Hz.

La prima figura mostra (in blu) il rumore generato da un segnale a 9000Hz affetto da un *jitter* gaussiano di 10nS (valore molto elevato).



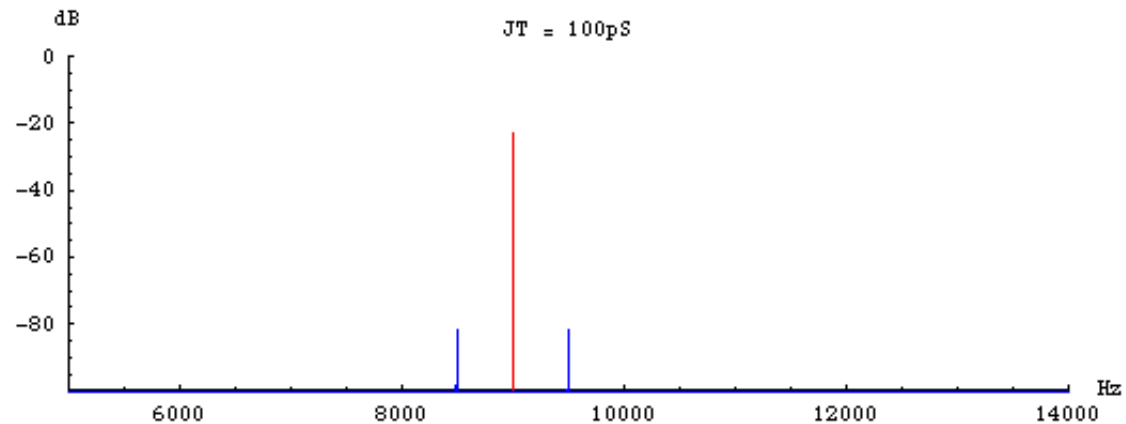
Segnale a 9000Hz ed effetto di un *jitter* casuale con distribuzione gaussiana di 10nS.

In questa figura, invece, un *jitter* variabile tra **1** e **10000 pS** ($1\text{pS} = 1000\text{nS}$) è stato applicato per un segnale a **900Hz**, un segnale a **9000Hz** e un segnale composito (**10 frequenze equispaziate con andamento decrescente a -6dB per ottava**) in questo ultimo caso, più realistico, si è considerato anche il rumore di discretizzazione a **16 bit**. Si nota come per bassi valori di *jitter* il rumore di discretizzazione sia dominante.



Valore del rumore al variare del *jitter* gaussiano per una frequenza di 900Hz (in blu) e 9000Hz (in rosso), per un segnale composito, in presenza di rumore di discretizzazione (in verde).

Vediamo ora il risultato di un *jitter* sinusoidale di **100pS picco-picco** applicato ad un segnale a **9000Hz**, si notano le bande laterali tipiche della modulazione di frequenza. Qui sono solo due, se il livello di modulazione aumentasse ne comparirebbero anche altre dovute agli effetti non lineari del processo di modulazione.



Segnale a 9000Hz ed effetto di un *jitter* sinusoidale di 100pS di valore picco-picco

Misure a lungo termine

Il rumore scorrelato indotto dal *jitter* casuale è di difficile individuazione sia all'ascolto che alla misura. In entrambi i casi si confonde con il rumore termico e di discretizzazione, questo fenomeno può influenzare il suono ma certamente meno avvertibile di altri parametri (primo tra tutti l'algoritmo di filtraggio digitale).

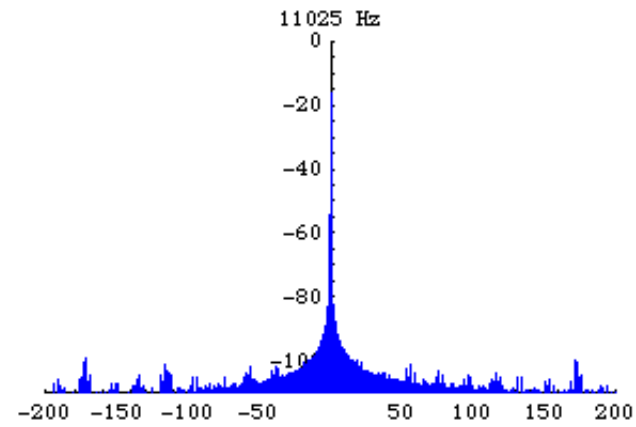
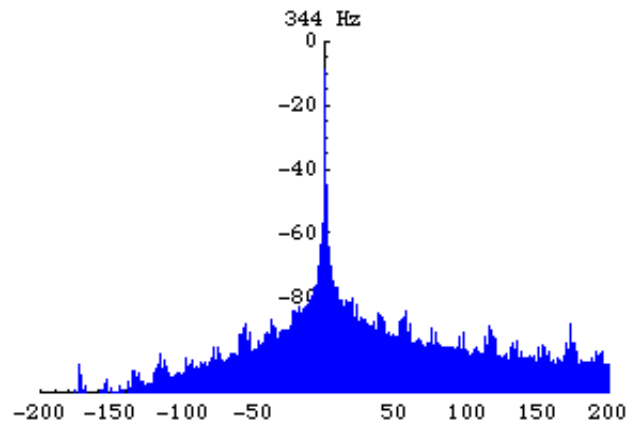
La modulazione di frequenza può invece, in linea di principio, essere individuata per via strumentale. Il problema è che una modulazione molto piccola resta sepolta nel rumore. Ci viene incontro un teorema che ci garantisce che nell'analisi di **Fourier**, aumentando il numero di campioni, il rumore casuale si distribuisce su tutti i valori del risultato (scendendo quindi di livello) mentre le componenti sinusoidali rimangono concentrate nelle posizioni corrispondenti alla loro frequenza. Questo significa che aumentando la durata della finestra di analisi le componenti correlate emergono (purtroppo lentamente) dal tappeto di rumore.

Con un analizzatore commerciale si possono fare analisi fino a qualche centinaio di migliaia di campioni, mentre i limiti di una analisi fatta con un potente PC sono di milioni di campioni. Noi abbiamo utilizzato uno sporco trucco (rubato alla radioastronomia) per allargare ulteriormente la finestra di misura .

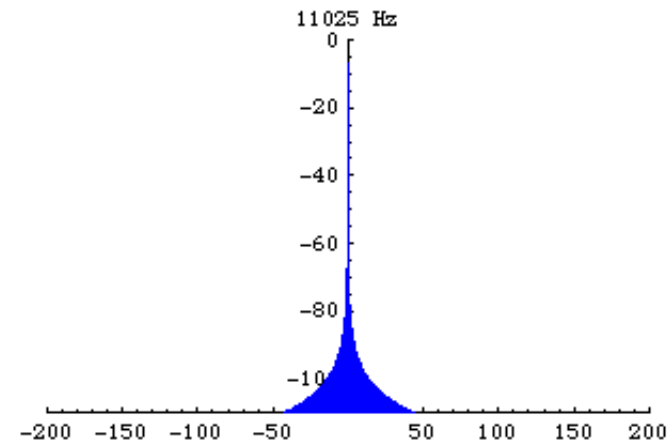
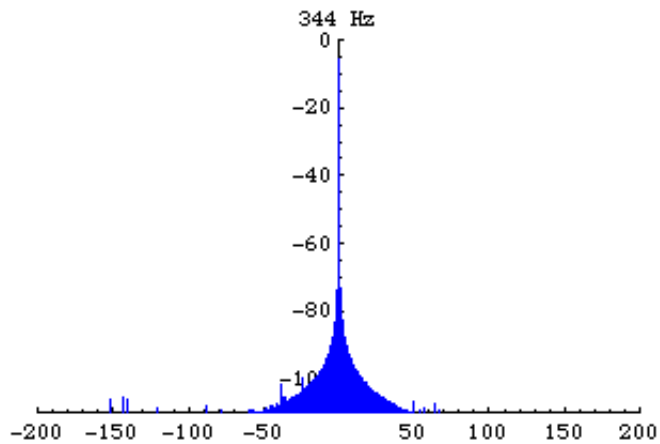
Come segnale originale sono stati scelti due toni puri di frequenza rispettivamente **$44100/4 = 11025$** e **$44100/128 = 344.531$** , queste frequenze permettono (se il clock rimane stabile) una analisi senza errori con finestre di lunghezza pari ad una potenza di due. Il segnale originale (della durata di **51** minuti) viene inciso su un **CDR** e suonato sulla macchina in prova. Il segnale analogico risultante viene di nuovo digitalizzato sul **PC** e separatamente eterodinato con i toni originali, in questo modo si ottengono due sequenze di campioni in ognuna delle quali uno dei toni originali è stato traslato a **0Hz**. Questi segnali vengono filtrati passa basso e sotto-campionati di un fattore 16, infine al risultato si applica una analisi di Fourier su **8 milioni** di campioni.

Il tutto è matematicamente equivalente ad una trasformata di **128** milioni di campioni (**51 minuti di analisi**) con una risoluzione di **0.00066 Hz** (meno di un millesimo di Hertz). Il fatto di utilizzare due frequenze diverse e di lavorare su entrambi i canali dovrebbe permettere di individuare meglio i disturbi provocati dal *jitter* (che sono maggiori ad alta frequenza e non dipendono dal canale).

Le prove sono state effettuate analizzando l'output analogico di un **Pioneer 7300** e di un videoregistratore-lettore **DVD Samsung SV-DVD1E** (utilizzato in modalità lettore **CD**). Dei molti grafici ottenuti presento i due più significativi.



Samsung, canale destro, il canale sinistro è praticamente indistinguibile.



Pioneer canale destro, il canale sinistro è praticamente indistinguibile.

Da questi grafici (e da tanti altri non riportati) si possono trarre le seguenti ipotesi:

- Il fatto che i canali destro e sinistro siano indistinguibili suggerisce che tutto quello che si vede dipende dal clock.
- La dispersione della fondamentale è dovuta al fatto che il clock delle apparecchiature in esame e quello del PC non sono identici (alcune prove effettuate sincronizzando i clock confermano questa ipotesi).
- Le spurie che compaiono a bassa frequenza sembrano più disturbate che *jitter* (non sono simmetriche), ad alta frequenza e con il Samsung comincia a comparire qualcosa (le spurie simmetriche). Vi ricordo che nelle prove ad alta frequenza il *jitter* è 32 volte maggiore. *N.B. in un impianto vero un segnale a 11025Hz alla massima potenza fonderebbe il tweeter risolvendo definitivamente tutti i problemi di jitter.*
- Il comportamento del Pioneer è molto buono per una macchina economica di dieci anni fa e fa supporre che macchine più recenti e costose (se ben costruite) siano anch'esse immuni dal *jitter* sinusoidale.
- Il comportamento del Samsung è leggermente peggiore ma bisogna considerare che si tratta di un videoregistratore combinato con un lettore DVD-video e l'uso come lettore CD è decisamente lontano dalla sua tipologia progettuale. Anche in questo caso tuttavia il *jitter* sinusoidale è a malapena avvertibile in una analisi di **51 minuti** e difficilmente può influenzare l'ascolto.

Problemi di interfaccia

Un altro processo che può essere inquinato dalle irregolarità del clock è la trasmissione e la ricezione di segnali su una linea digitale.

Bisogna anche distinguere il caso in cui il segnale ricevuto viene direttamente convertito in analogico oppure viene bufferizzato e memorizzato.

Nel primo caso si applicano tutte le considerazioni viste fino nei paragrafi precedenti: le irregolarità di clock e le distorsioni possono essere direttamente udibili.

Quando invece il segnale viene bufferizzato e/o memorizzato il trattamento dell'interfaccia avviene tutto a livello digitale e l'unico possibile problema è che la sequenza di bit memorizzata nel dispositivo ricevitore non sia identica a quella originale memorizzata nel trasmettitore.

Ovviamente **l'interfaccia è come la suocera, è sempre preferibile farne a meno!** Se il problema è solo ascoltare un CD o un DVD basta acquistare un lettore integrato (ve ne sono anche da 10.000 Euro e più) investendo al meglio i nostri soldi. Se invece l'impianto è più complicato con più sorgenti digitali da connettere ad amplificatori audio-video o a computer o altro allora i cavi digitali sono indispensabili.

L'analisi di questa situazione può essere fatta con l'aiuto del computer. Ho scelto un brano (la traccia n 3 del disco prova di **Audio Car Stereo** del 2001, un brano di **4 minuti e 36**) e l'ho convertito in **WAV** più volte, con vari programmi di ripping, controllando bit a bit le varie copie fine ad ottenerne una assolutamente affidabile.

Ho collegato l'uscita digitale del **CD player Pioneer** con l'ingresso della **DMX fire24/96** utilizzando uno dei cavi da provare. Il clock usato dalla scheda del PC era quello esterno del lettore (ricostruito attraverso il cavo stesso). Quindi ho suonato ripetutamente questo brano

sul Pioneer registrando il risultato sul PC e infine ho confrontato bit a bit i brani registrati con quello di riferimento attraverso un opportuno programma Java.

Per la connessione digitale avevo due alternative, il **cavo coassiale** e il cavo ottico **TOSlink**. Per quanto riguarda quest'ultimo ho comprato due esemplari economici di lunghezza rispettivamente di **1** e **3** metri. Per quanto riguarda il cavo coassiale le specifiche **SPDIF** impongono un cavo coassiale per alta frequenza dall'impedenza di **75Ω**. Escludendo i cavi costosi (**io escludo sempre i cavi costosi visto che non posso permettermeli e non ho nessuno che me li presta**) vi sono alcune possibilità economiche: usare cavi video con terminazione RCA, usare cavi video per antenna (quelli che si mettono tra il televisore e la presa nel muro) cambiando le terminazioni, oppure acquistare direttamente un cavo **RF** da **75** e mettervi le terminazioni (**N.B.** il cavo coassiale Ethernet è da **50Ω** e non va bene).

Le prove sono state effettuate con i seguenti cavi:

- **COAX 5m.** Un cavo coassiale a doppia schermatura da **75Ω** per segnali video a radio frequenza, acquistato con le terminazione per le prese di antenna. Le terminazioni sono state sostituite con connettori **RCA** di media qualità (costo cavo **4** Euro, costo terminazioni **6** Euro)
- **COAX 3m.** Ottenuto dal precedente prendendone solo 3 metri.
- **COAX 1m.** Cavo artigianale costruito con **1** metro di cavo coassiale da **75Ω** per RF a singola schermatura (costo cavo **1** Euro, costo terminazioni **2** Euro)
- **Video giallo.** Il cavo da **1.5** metri per collegamenti video fornito in dotazione al DVD player Samsung. Le terminazioni RCA (in plastica gialla) erano già presenti.
- **OPTI 1m.** Cavo ottico TOSlink economico (**15 Euro**) da **1** metro.
- **OPTI 3m.** Cavo ottico TOSlink economico (**27 Euro**) da **3** metri.

È stata dapprima effettuata una batteria di circa 70 prove (più di 5 ore di musica per ogni cavo) poi i cavi peggiori sono stati messi da parte e il cavo da 5 metri è stato convertito in uno da 3 metri (**applicando la legge del taglione**). I due cavi da 3 metri (quello ottico e quello coassiale) sono stato quindi provati ancora fino a raggiungere le 500 tracce cadauno. Gli errori riscontrati sono stati di due tipi: una alterazione del segnale (indicata con **ALT**) e una perdita di segnale (indicata con **DROP**) entrambe con una durata di qualche centinaio di millisecondi. I risultati sono riassunti nella seguente tabella.

cavo	prove	ALT	DROP	perc. errori
COAX 1m	72	-	2	2.8%
COAX 5m	71	-	5	7%
Video giallo	71	1	1	2.8%
OPTI 1m	71	2	3	7%
COAX 3m	500	4	9	1.8%
OPTI 3m	500	4	1	1%

I risultati sono stati molto buoni, per esempio l'ultima riga significa che per il cavo ottico da 3 metri su 500 tracce trasferite solo 5 sono stati alterate (ognuna per meno di un secondo) e **tutti gli altri 194 miliardi di bit sono passati indisturbati**.

Globalmente su queste misure si possono fare le seguenti considerazioni:

- Le prove hanno riguardato non solo i cavi ma l'intera catena di misura compreso il lettore CD, il ricevitore della scheda audio e il percorso all'interno del PC.
- Le apparecchiature in prova erano molto economiche, soprattutto il ricevitore (che è la parte più critica) faceva parte di una scheda da 200 Euro. Con apparecchiature Hi-End i risultati *dovrebbero* essere migliori.
- I cavi ottici hanno dato risultati migliori forse perché immuni ai disturbi elettromagnetici che certamente erano presenti nei dintorni del PC. Di questo bisogna tenere conto quando si assemblano collegamenti digitali complessi (molte apparecchiature, molti canali, ambienti disturbati). Anche se un buon cavo coassiale è teoricamente migliore di uno ottico, la scelta non può prescindere dall'ambiente e dal tipo di installazione.
- In nessun caso il segnale è stato sporcato per lunghi periodi quindi anche con questa catena economicissima non sono possibili alterazioni timbriche dovute all'interfaccia.

Conclusioni

Qualche risposta a domande comuni sull'argomento

1) Copie digitali di CD posso suonare diversamente dall'originale?

Certamente sì. Ogni CD consta di una parte di informazione (quello che si voleva stampare) e una parte di errori causali (le imperfezioni e lo sporco). Quando si copia, se va bene i dati restano gli stessi e le imperfezioni variano in maniera casuale; se va male anche i dati cambiano per colpa delle imperfezioni originarie o di difetti nel processo di copia.

2) come è che le imperfezioni influenzano il suono?

a) se sono gravi possono corrompere i bit (nel senso che qualche zero viene letto come uno e viceversa) e se questi errori sono molti possono non essere tutti corretti dai bit di parità alterando i campioni che vengono suonati. In ogni caso dubito molto che un eventuale singolo campione alterato possa produrre effetti udibili.

b) può darsi che il superlavoro dei servomeccanismi per seguire una traccia sporca o un disco che oscilla o le vibrazioni esterne al CD player causino un assorbimento di corrente che si ripercuote sul segnale analogico in uscita. In questo caso l'uscita SPDIF può essere perfetta e l'uscita analogica disturbata. Questo inconveniente veniva temuto agli albori della tecnica CD ed era una delle ragioni per cui sono stati inventati gli stabilizzatori del disco. I lettori di migliore qualità presentano (a torto o a ragione) due o tre alimentazioni separate, trasformatore compreso.

c) se il clock usato per la conversione viene ricavato attraverso un PLL dal segnale del CD in lettura allora le imperfezioni producono inevitabilmente *jitter*. Questo modo di procedere

l'ho trovato descritto nei manuali ma, secondo me, questo poteva accadere 15 anni fa, adesso i buffer li mettono anche negli walkman da 50 euro e le vibrazioni e le imperfezioni del disco non dovrebbero più influenzare direttamente il clock di conversione.

d) inoltre c'è il *jitter* vero e proprio dovuto al clock interno che, a sua volta, se l'alimentazione non è ben stabilizzata, potrebbe essere influenzato dal superlavoro dei servomeccanismi.

Il fenomeno (a) è possibile solo in caso di gravi imperfezioni del disco (al limite il disco viene non riconosciuto). I fenomeni (b) (c) e (d) dovrebbero essere presenti solo su lettori economici o mal progettati.

3) è possibile avere un SPDIF corretto in presenza di *jitter* udibile?

Certamente sì. Infatti il segnale SPDIF viene decodificato da un ricevitore che deve trasformarlo in digitale e in questo processo le cose POSSONO andare a posto (nel senso che i bit vengono memorizzati bene). Il convertitore D/A invece converte lo stream in analogico e qui si POSSONO sentire i difetti della base dei tempi.

Non vorrei sbilanciarmi troppo ma secondo me il *jitter* è un fenomeno che esiste dal punto di vista matematico e che è rilevabile anche strumentalmente ma che non dovrebbe avere influenza all'ascolto. Con questo non voglio smentire coloro che sentono profonde differenze nel suono dei giradischi digitali, non riesco però a capire come facciano tra le decine di possibili cause a dare la colpa proprio al *jitter*.

Anche su Internet, guarda caso, gli articoli divulgativi che danno importanza al *jitter* si trovano soprattutto nei siti delle aziende che vendono costosi rimedi al fenomeno

Quello che è probabilmente vero è che apparecchi più costosi e sofisticati (se non sono fregature) hanno contemporaneamente un basso *jitter* e un buon suono perché tutti i parametri sono migliori. Da questo punto di vista io preferirei spendere di più per un apparecchio completo (possibilmente con un solo telaio) piuttosto che acquistare costosi accrocchi da aggiungere ad apparecchi più economici, oppure pagare per due telai quello che poteva essere investito in componenti di migliore qualità.

Solo in presenza di differenze di suono che siano strettamente correlabili con differenze di *jitter* (e in assenza di altre differenze di topologia e progetto) si potrebbe attribuire con certezza un'influenza sonora a questo sfuggente fenomeno.