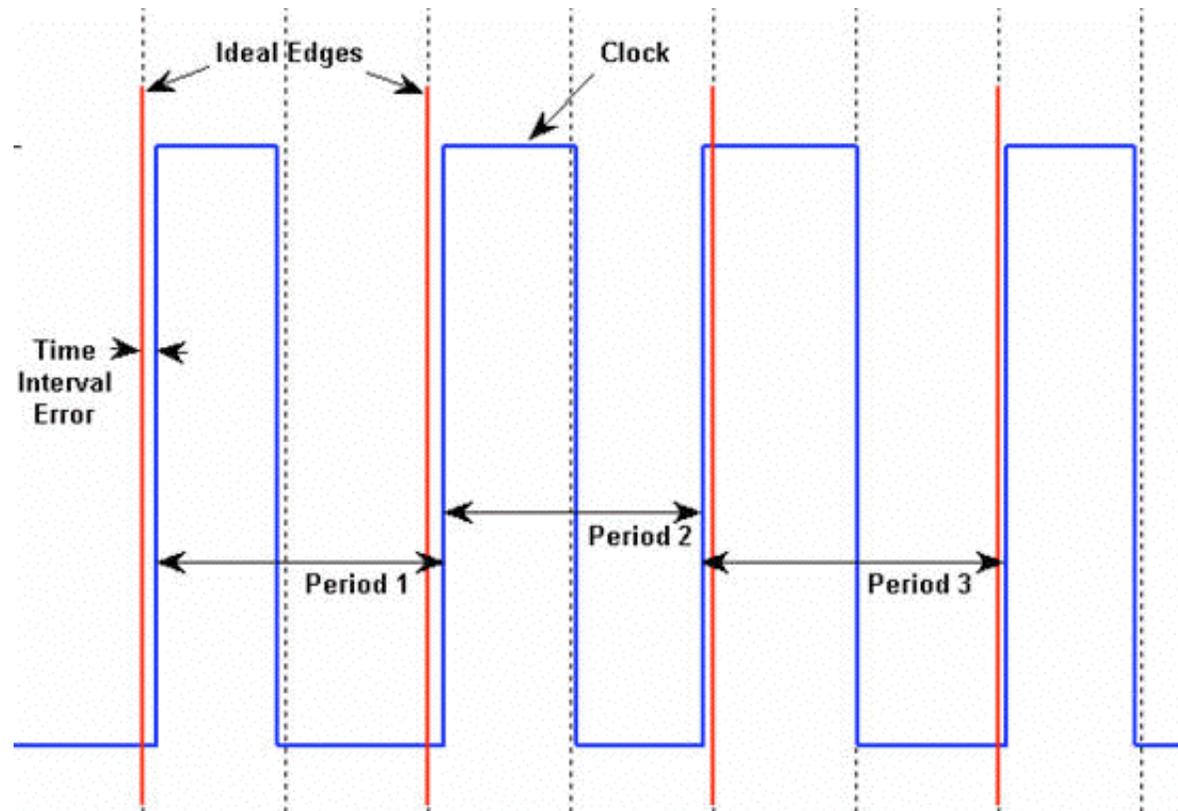


12

Il Jitter

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 di dare il nome di **jitter** a molti fenomeni di tipo molto diverso tra loro.



Sampling Jitter

Influenza del clock sul campionamento

Per cominciare prendiamo in esame il caso di un segnale analogico campionato ad intervalli di tempo non perfettamente regolari. Questa è l'idealizzazione di ciò che accade in un convertitore AD, astraendo però dall'influenza della quantizzazione.

Sia $s(t)$ la funzione da campionare con intervallo di campionamento Δ , i valori campionati dovrebbero essere

$$s(k \Delta)$$

ma a causa dell'errore sul clock sono invece

$$s(k \Delta + \varepsilon_k).$$

L'errore su ogni campione vale

$$E_k = s(k \Delta + \varepsilon_k) - s(k \Delta)$$

Supponiamo che il segnale sia una sinusoide di frequenza f e ampiezza V :

$$s(k \Delta) = V \cos(2 \pi f k \Delta)$$

e che gli errori ε_k siano sufficientemente piccoli da poter trascurare i termini di ordine superiore, abbiamo allora

$$E_k = V \cos(2 \pi f k \Delta) - V \cos(2 \pi f (k \Delta + \varepsilon_k))$$

e si può dimostrare che

$$|E_k| < 2 \pi f V \varepsilon_k.$$

Questo risultato si può interpretare nel modo seguente.

- l'errore commesso alterando la base dei tempi è proporzionale alla frequenza f . 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**, l'**errore di discretizzazione**, ecc.) 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.

La formula può venire utilizzata per ottenere una prima limitazione ai valori di **jitter** tollerabili: supponendo di voler digitalizzare un segnale a **1000 Hz, 0 dB** con un errore legato al **jitter** inferiore a n bit di risoluzione si ottiene

$$\varepsilon_k < \frac{2^{-n}}{2\pi 1000} \text{ sec}$$

e i valori corrispondenti sono mostrati nella seguente tabella:

Risoluzione (bit)	16	18	20	22	24
Rumore equivalente (dB)	96	108	120	132	144
Limite sul Jitter (pSec)	2.400	607	151	38	9.5

Attenzione quello mostrato in tabella non è un limite di udibilità ma solo un'idea degli ordini di grandezza con avremo a trattare. È interessante che, supponendo di trattare segnali musicali in cui le note acute abbiano una attenuazione di **6 dB / ottava** si ottengono gli stessi limiti per qualunque frequenza sopra i **1000 Hz**.

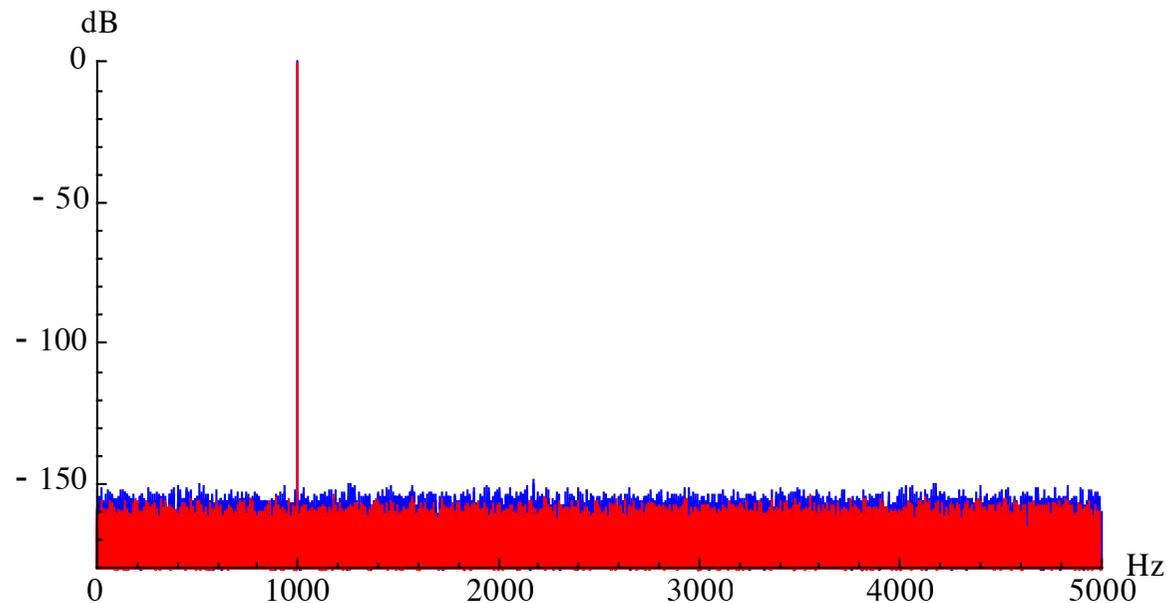
Natura del Jitter

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 **44100.0001 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'errore è **correlato** col segnale oppure con un disturbo esterno (per esempio i **50 Hz** di rete). In questo caso l'effetto consiste in una modulazione di frequenza del segnale musicale.

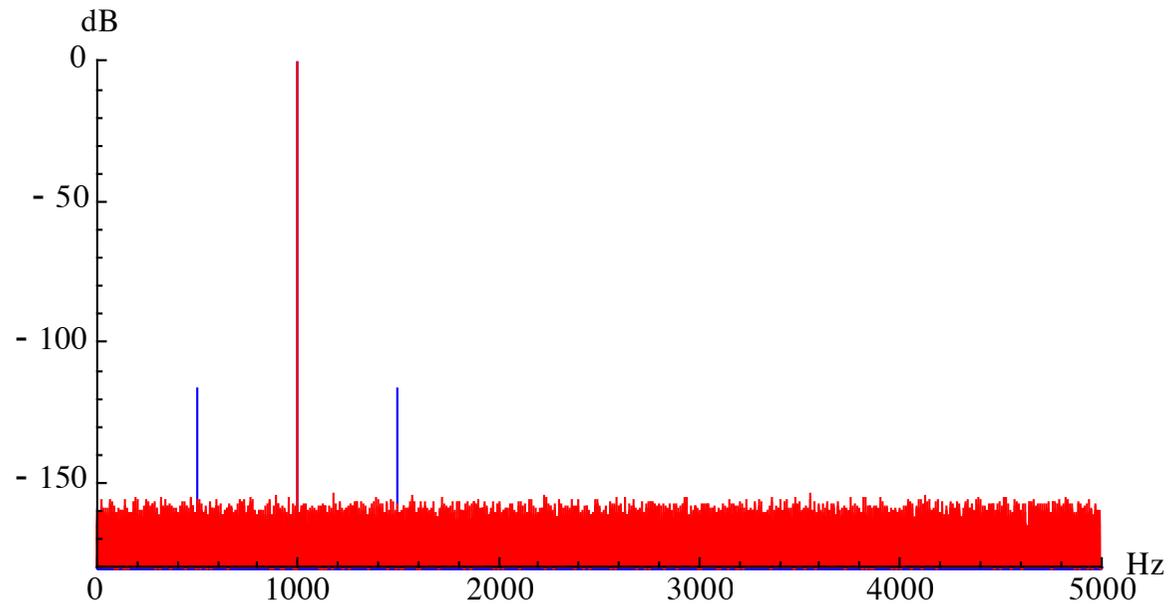
Nel caso di errore temporale casuale anche la distorsione conseguente è casuale ed ha la stessa natura di un rumore e può confondersi facilmente con questo.

Nella figura seguente si vede il rumore causato da un **jitter random** (in blu) di **1 nSec** picco-picco su un segnale a **1000 Hz, 0 dB**, confrontato con il rumore di discretizzazione (in rosso) con una profondità di **20 bit** con **dither uniforme**, la frequenza di campionamento è di **48 KHz**.



Se invece l'errore temporale ha una struttura precisa allora la distorsione conseguente è correlata con il segnale ed ha una struttura completamente diversa.

Ecco l'effetto di un **jitter sinusoidale** (in blu) di **1 nSec** picco-picco su un segnale a **1000 Hz, 0 dB**, confrontato con il rumore di discretizzazione (in rosso) con una profondità di **20 bit** e **dither uniforme**, la frequenza di campionamento è di **48 KHz**. Il risultato è del tutto equivalente ad una modulazione di frequenza e si notano infatti le due bande laterali distanziate di 500 Hz dalla fondamentale.



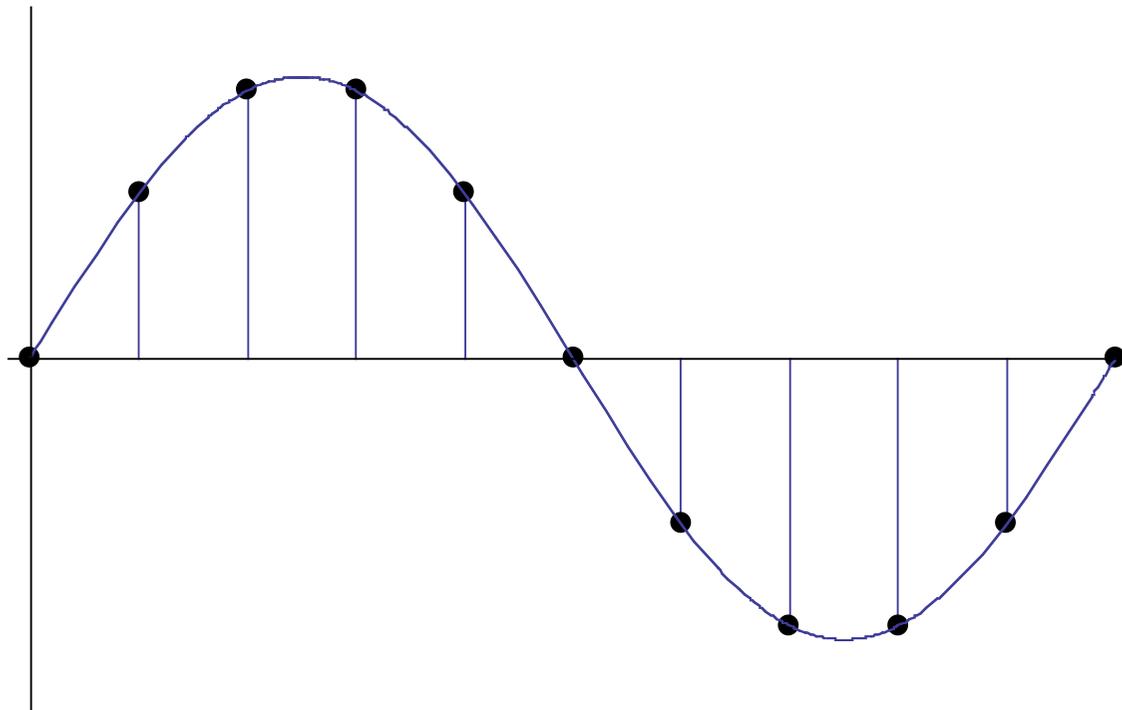
Se la frequenza del **jitter** è piccola le bande laterali sono molto vicine al segnale originale e molto probabilmente vengono mascherate da questo, risultando poco udibili.

Il Jitter nella conversione AD

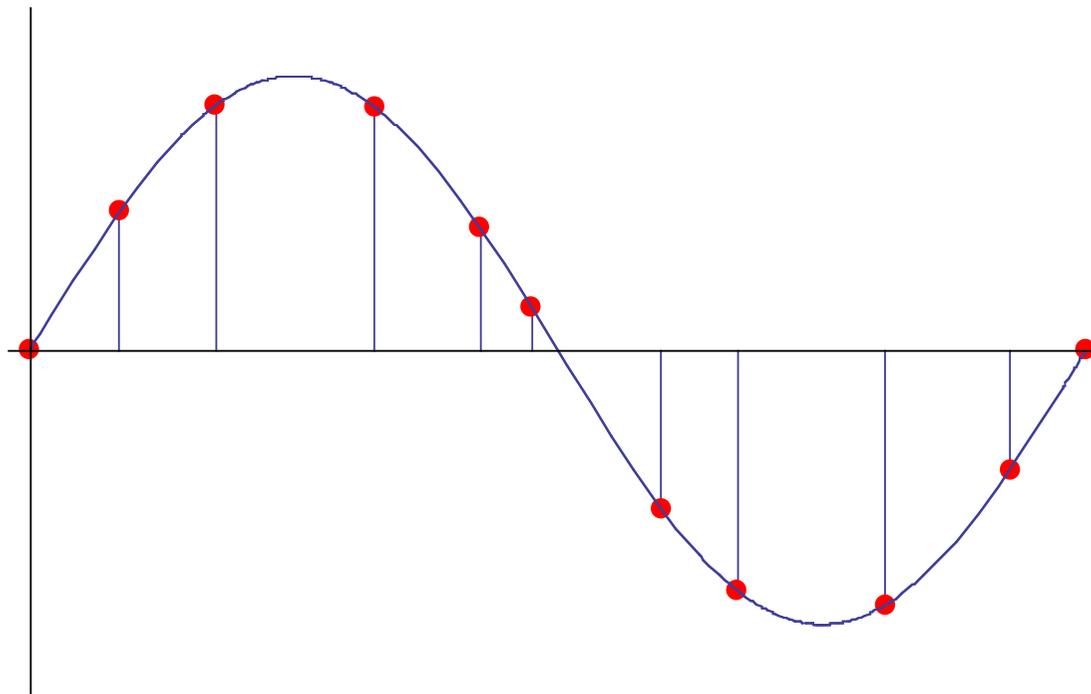
Di solito se ne parla poco ma il problema del **jitter** sussiste anche al momento della conversione **AD**: eventuali errori sul clock al momento della conversione si ripercuotono sul processo di digitalizzazione, producendo un segnale sporcato.

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

Questo è una sinusoide campionata correttamente



Mentre questa è una sinusoide in cui l'errore di clock nel campionamento AD è volutamente esagerato.



Da un punto di vista matematico si può dire che invece della sequenza di coppie

$$\{ \dots (-2 \Delta, s(-2 \Delta)), (-\Delta, s(-\Delta)), (0, s(0)), (\Delta, s(\Delta)), \dots \}$$

viene prodotta la sequenza

$$\{ \dots (-2 \Delta + \eta_{-2}, s(-2 \Delta + \eta_{-2})), (-\Delta + \eta_{-1}, s(-\Delta + \eta_{-1})), (\eta_0, s(\eta_0)), (\Delta + \eta_1, s(\Delta + \eta_1)) \dots \}$$

Si noti che le funzioni sono correttamente campionate nelle ascisse corrispondenti, se il segnale venisse convertito in analogico con un convertitore **privo di ogni correzione di jitter** la sinusoide verrebbe ricostruita **perfettamente**.

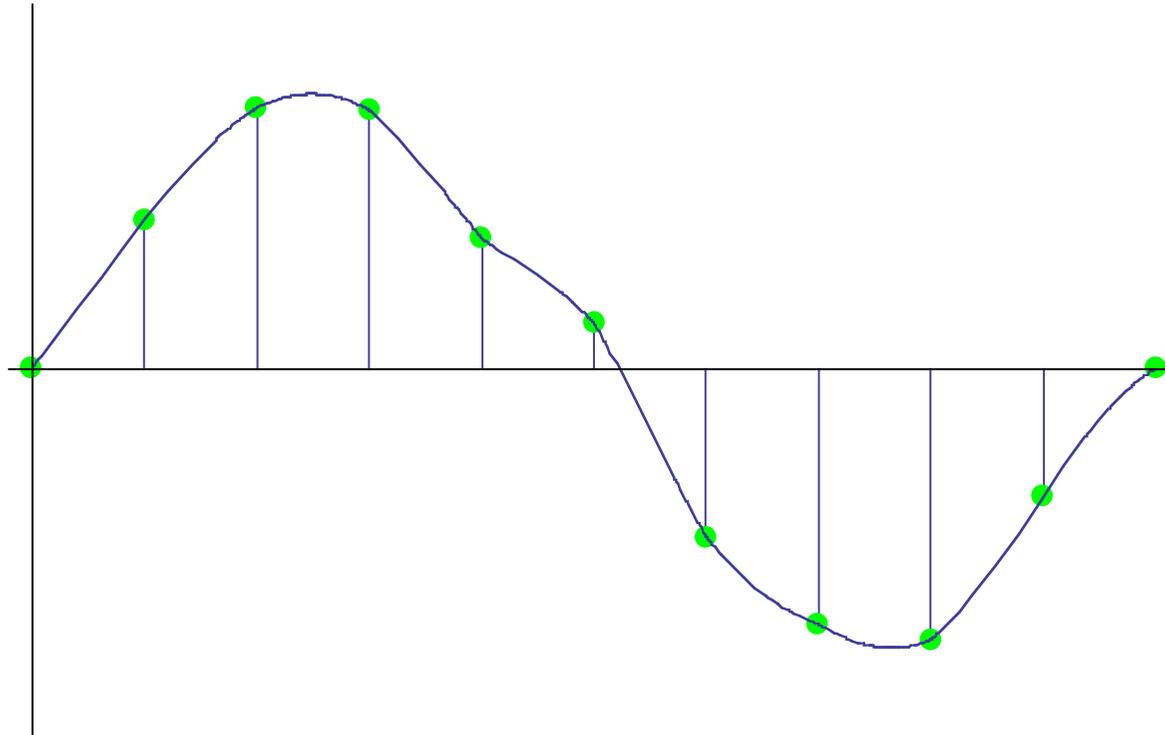
Quello che accade invece è che i campioni vengo memorizzati su un supporto privo di clock (per esempio un **hard disk**) nella forma seguente

$$\{ \dots s(-2 \Delta + \eta_{-2}), s(-\Delta + \eta_{-1}), s(\eta_0), s(\Delta + \eta_1) \dots \}$$

che corrisponde a presupporre

$$\{ \dots (-2 \Delta, s(-2 \Delta + \eta_{-2})), (-\Delta, s(-\Delta + \eta_{-1})), (0, s(+\eta_0)), (\Delta, s(\Delta + \eta_1)) \dots \}$$

visto che **l'errore sul clock non è noto** e non può essere memorizzato, al che corrisponde una sinusoide distorta (nella figura in modo esagerato)



Quindi, come le stecche del soprano o i colpi di tosse l'errore di **jitter** nella conversione **AD** viene per sempre sepolto nell'incisione e non può più essere corretto in alcun modo.

L'unico rimedio è preventivo: usare un **clock** di alta qualità durante la registrazione, cosa che si spera facciano almeno i migliori professionisti.

Il Jitter nella conversione DA

Trascurando l'errore di **jitter** dovuto alla registrazione, sia perché non è comunque correggibile sia perché lo si suppone trascurabile, ovvero ponendo gli η_k a zero, sul supporto ci troviamo un segnale senza clock

$$\{... s(-2 \Delta), s(-\Delta), s(0), s(\Delta) ... \}$$

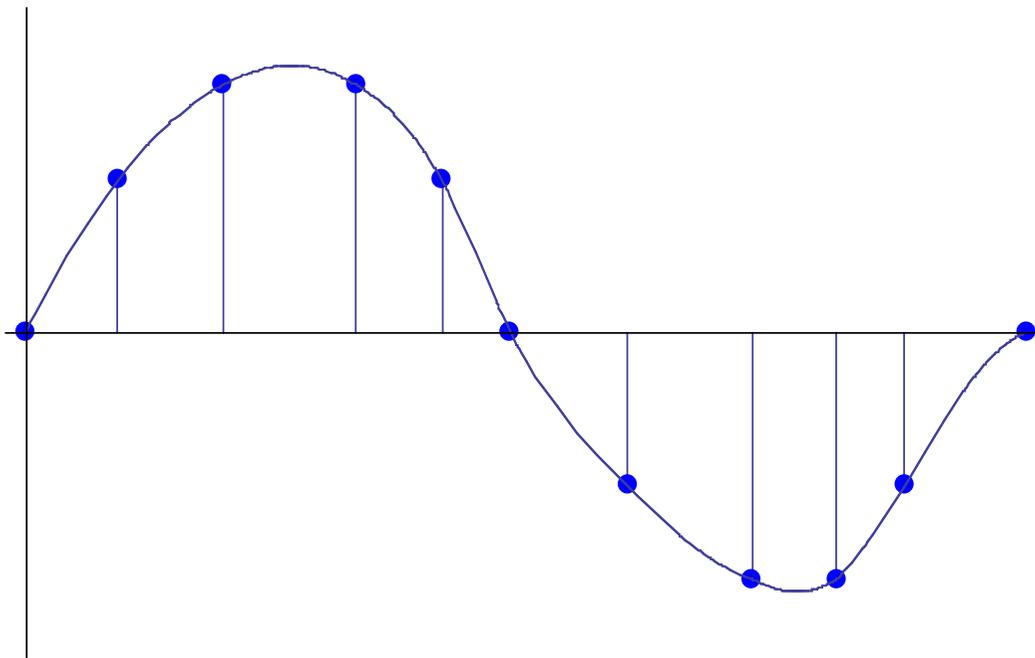
a cui dovrebbe corrispondere il segnale ideale

$$\{... (-2 \Delta, s(-2 \Delta)), (-\Delta, s(-\Delta)), (0, s(0)), (\Delta, s(\Delta)) ... \}$$

purtroppo l'impossibilità di sincronizzare perfettamente la lettura del supporto fa sì che venga invece prodotto un segnale affetto da **jitter**

$$\{... (-2 \Delta + \varepsilon_{-2}, s(-2 \Delta)), (-\Delta + \varepsilon_{-1}, s(-\Delta)), (\varepsilon_0, s(0)), (\Delta + \varepsilon_1, s(\Delta)) ... \}$$

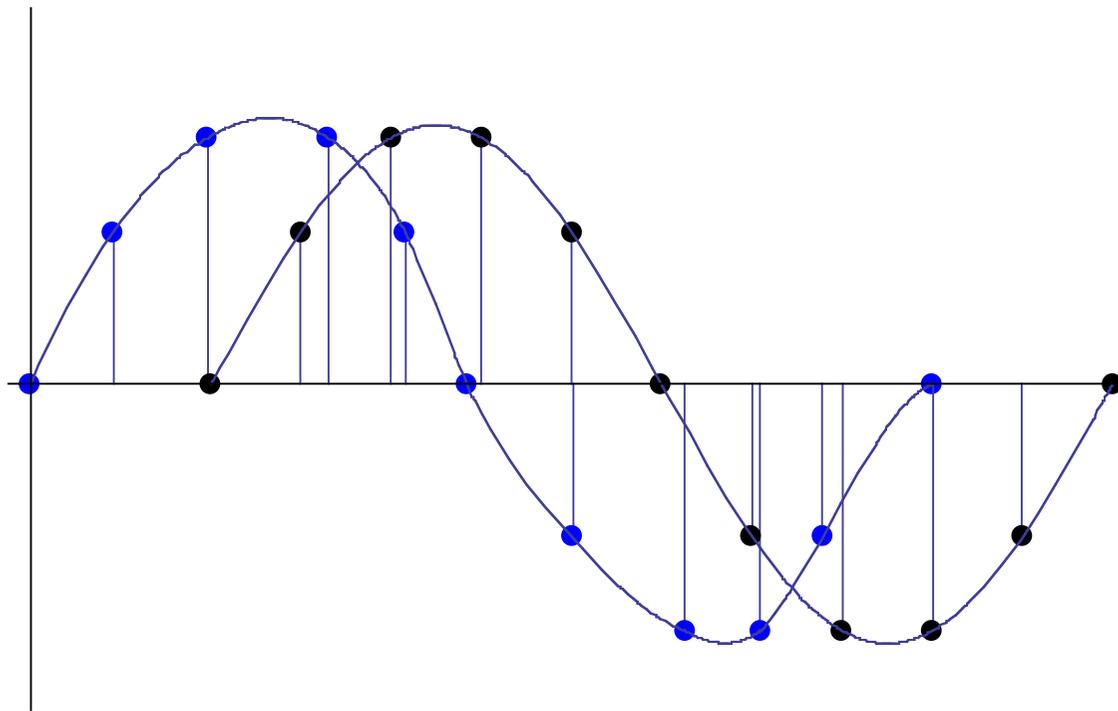
Si noti che in questo caso la forma dell'errore è completamente diversa rispetto al **jitter** nella conversione **AD**. In questo caso i valori dei campioni sono valutati in istanti diversi da quelli scanditi dal clock impreciso e quindi la sinusoide dell'esempio viene deformata e un convertitore **privo di ogni correzione di jitter** la ricostruirebbe **in modo errato**.



A differenza del caso precedente al convertitore viene fornito sia il **clock impreciso** che il **segnale corretto** e quindi sono possibili diversi rimedi.

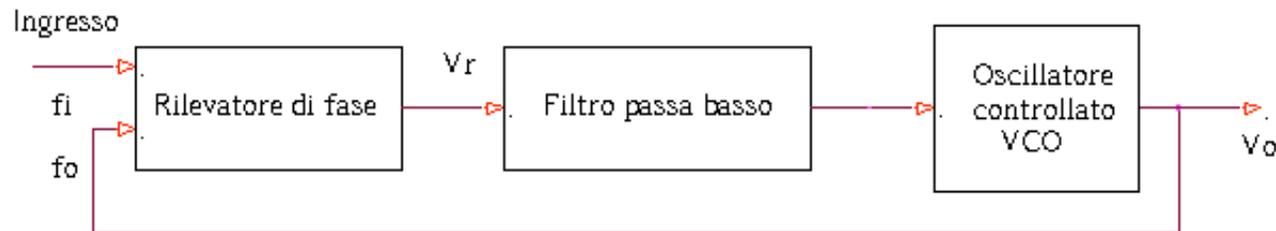
Bufferizzazione

Se il segnale affetto da **jitter** viene immesso in un **buffer di memoria** da cui viene estratto con un clock ad alta precisione l'errore di **jitter** viene ridotto di conseguenza. Si noti come l'uso del **buffer** implichi un inevitabile ritardo che nella figura è esemplificato con due soli cicli di clock ma che in pratica può essere molto maggiore.



Uso dei PLL

Il **PLL (Phase-Locked Loop, Circuito ad aggancio di Fase)** è un tipo di circuito (digitale o analogico) che contiene un oscillatore controllato in tensione alimentato da un segnale proporzionale alle differenze di fase tra il segnale in ingresso e quello generato internamente.

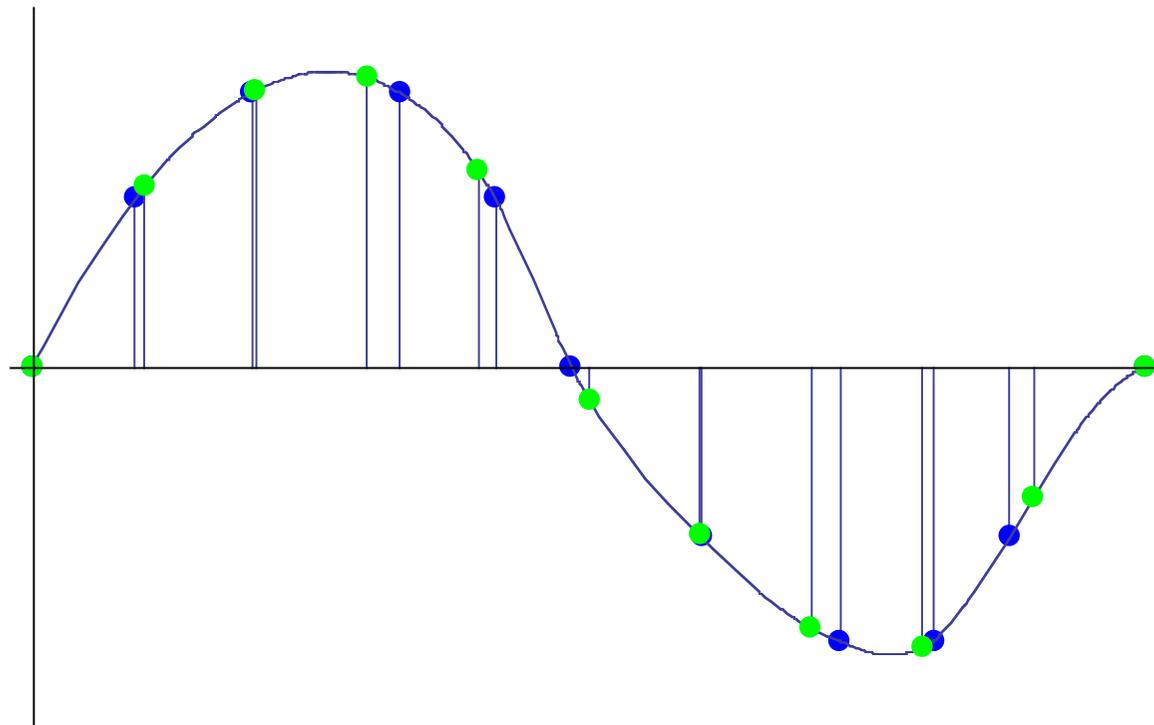


Un circuito del genere ha moltissime applicazioni, in particolare, interponendolo tra il circuito di acquisizione e il convertitore **DA**, può essere configurato per ridurre notevolmente l'errore di **jitter**. In pratica i campioni rimangono gli stessi ma vengono agganciati ad un clock di

migliore qualità. È questa la tecnica più usata per ridurre il **jitter**, spesso, anche con due **PLL** in cascata.

Un non rimedio: la conversione asincrona

Se il segnale affetto da **jitter** viene inviato ad un interpolatore agganciato ad un clock ad alte precisione che effettua una conversione di frequenza in tempo reale si ottiene in uscita un segnale campionato ad intervalli di tempo **più precisi**. Questa operazione è **indispensabile** se si devono miscelare segnali provenienti da sorgenti non sincronizzate o se si deve alimentare un amplificatore digitale **PWM** ma dal punto di vista del suono l'operazione di interpolazione si limita a congelare l'errore di **jitter** presente senza correggerlo in alcun modo. Nella figura si passa dai punti blu ai punti verdi (perfettamente distanziati nel tempo) ma come si vede la deformazione rimane inalterata.



Il Jitter 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 seriale**.

Il modello che prendiamo in considerazione non è più la trasmissione ad istanti determinati di numeri reali ma la trasmissione di un segnale analogico che rappresenta sotto forma di impulsi una serie di bit.

Le onde quadre

Un segnale **digitale** viene trasmesso, tipicamente come un segnale continuo che si alterna tra due valori diversi (per semplicità supponiamo 0 ed 1). La transizione tra 0 e 1 viene idealmente considerata immediata e quindi un segnale che rappresenta la sequenza ...101010110101010... è un'onda quadra.

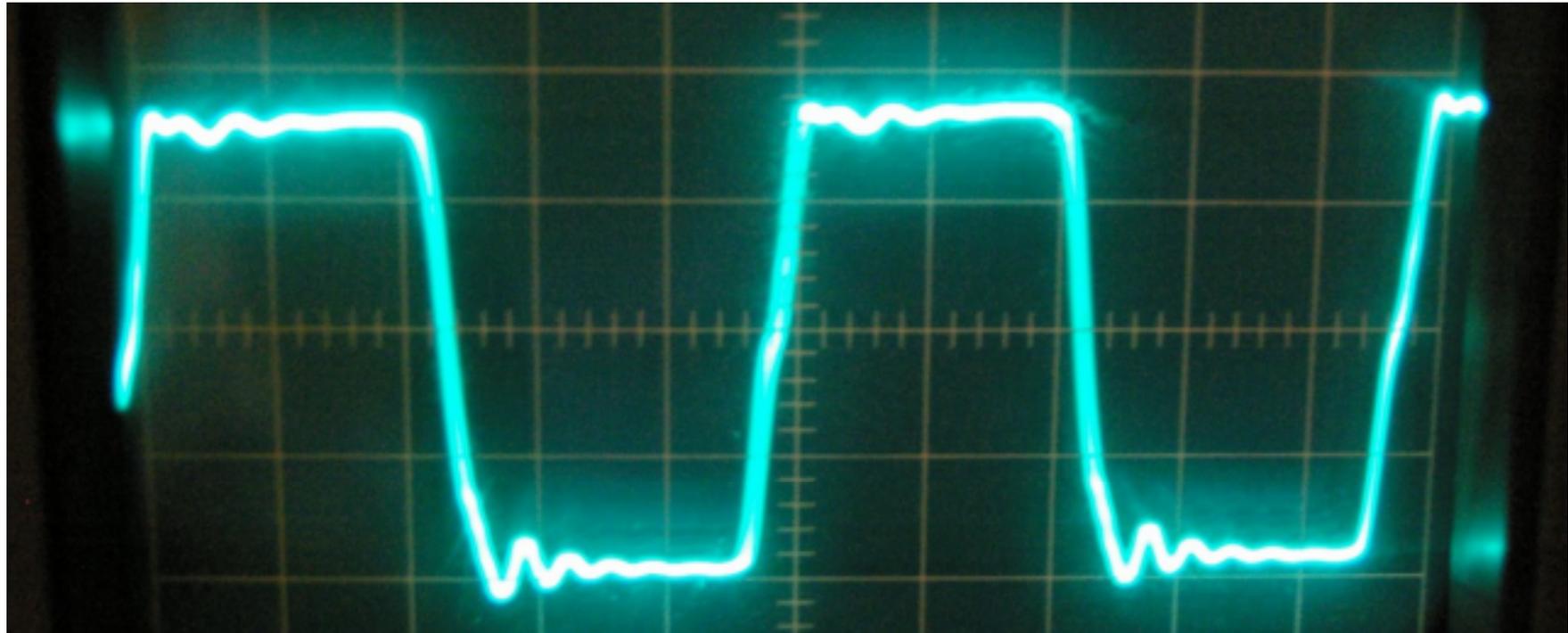


Dalla **Trasformata di Fourier** (o anche dalla **Serie di Fourier** visto che si tratta di un segnale periodico) si nota che la banda di frequenza occupata da un onda quadra è infinita e che quindi questo è un segnale ideale **non realizzabile nella realtà fisica**.

In pratica ogni tentativo di trasmettere un'onda quadra produce un segnale a banda limitata in cui

- i fronti di salita e discesa sono di durata non nulla
- l'intera onda è deformata

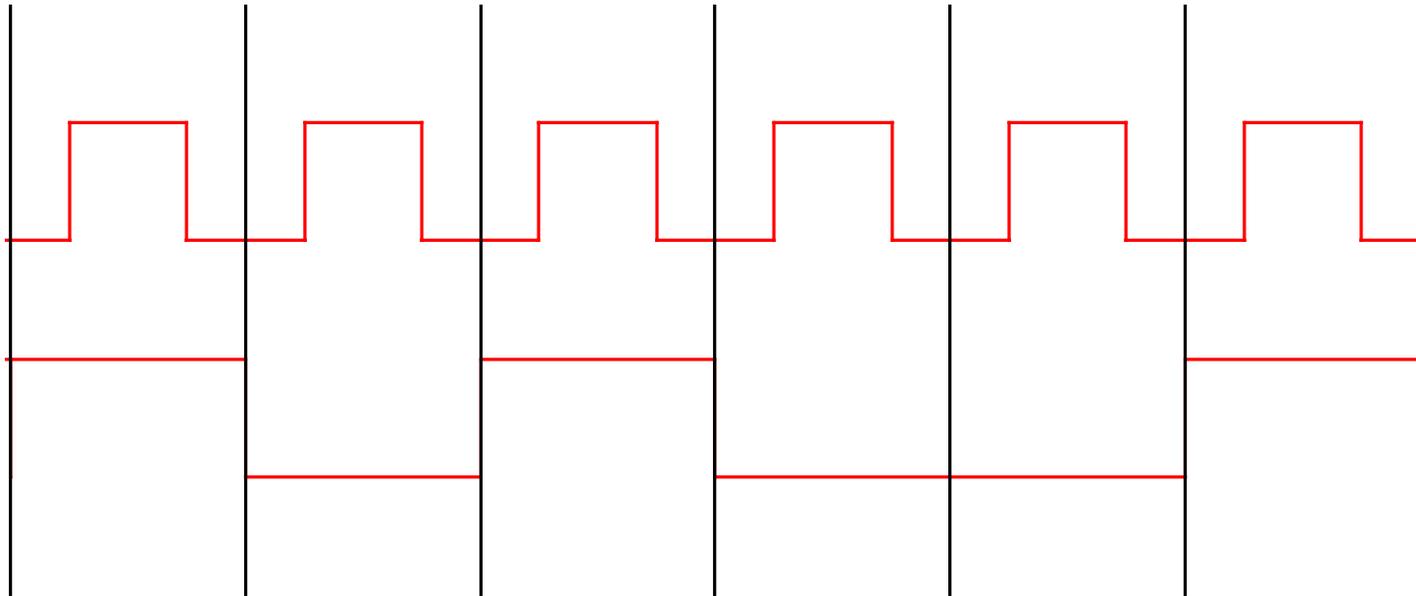
Ne segue che nel considerare il problema della trasmissione di dati come segnali elettrici bisogna considerare non solo le irregolarità di clock ma anche le deformazioni della forma d'onda. La figura seguente mostra un'onda quadra reale visualizzata su di un oscilloscopio



Nota Bene: ogni circuito e ogni **linea di trasmissione** (anche un semplice cavo) hanno una ben precisa banda passante per cui se si tenta di impaccare maggiormente i dati (aumentando la frequenza di **clock**) le deformazioni delle onde arrivano al punto in cui il tasso di errori è così elevato che non è più possibile la **trasmissione digitale**.

Clock distinto dal segnale

La situazione più semplice per il trattamento di dati digitali è quella di avere i valori che rappresentano i bit, sincronizzati da un'onda quadra che funge da clock. In questo caso vi sono due segnali distinti, di cui uno è un'onda quadra pura e l'altro un segnale che si alterna tra due livelli a seconda dei valori dei bit che rappresenta. Nella figura che segue è esemplificata una situazione di questo tipo. Il segnale superiore è il clock il segnale inferiore rappresenta i dati. In questo caso i valori "alti" del clock corrispondono ad un momento in cui il segnale che porta i dati dovrebbe essersi stabilizzato e quindi in tale intervallo di tempo è facile distinguere tra il valore 0 e il valore 1 anche in presenza di deformazioni.



Questa soluzione è quella adottata all'interno delle apparecchiature dove un master clock sincronizza tutte le operazioni sui segnali digitali.

Nota Bene: in pratica quando si implementano circuiti elettronici digitali vi sono molte alternative per rappresentare e sincronizzare il segnale, le figure che mostriamo in queste dispense sono solo esemplificative e spesso (sempre) la realtà è molto più complicata.

Clock unito al segnale

Un modo più economico per far lavorare insieme apparecchiature digitali separate è quello di combinare insieme clock e segnale, in questo caso bastano solo due fili (per esempio un semplice cavo schermato) per far passare segnali da una macchina all'altra. Lo stesso problema si pone quando si usano supporti (**CD**, **DVD**, ecc.) dove è presente il solo segnale

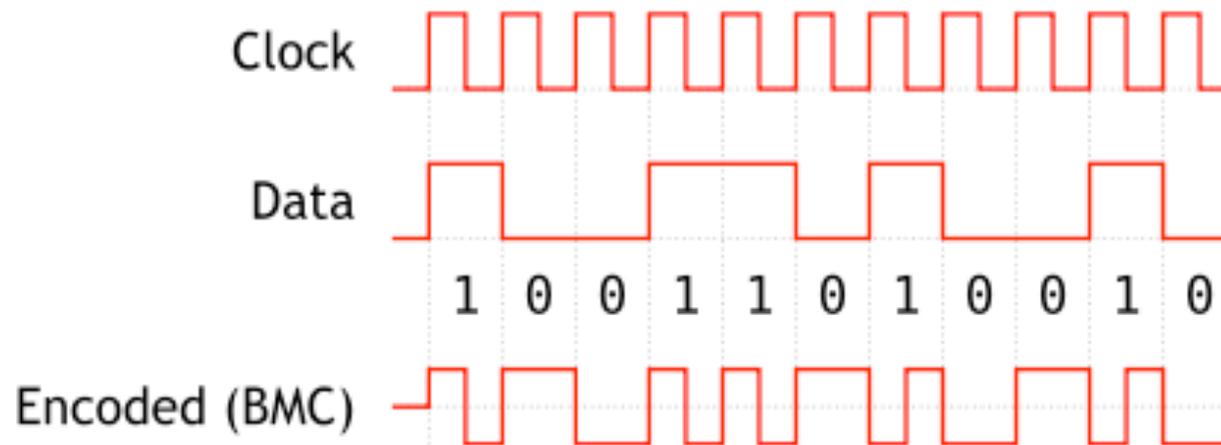
Per potere ricostruire il clock dal segnale è necessario che questo abbia alcune caratteristiche aggiuntive, per esempio sono da evitare lunghe sequenze di zeri o di uni che configurandosi come lunghi tratti a valore costante potrebbero far perdere il sincronismo ai circuiti che devono rilevare il clock (tipicamente un **PLL**).

Come già visto nel **CD** si usa la **EFM (Eight to Fourteen Modulation)** che insieme ai bit di colla garantisce un numero sufficiente di transizioni da far lavorare tranquillamente il **PLL** che segue. Nel **DVD** il numero di bit viene addirittura raddoppiato (**modulazione da 8 a 16**).

Un altro interessante tipo di codifica è il **Biphase Mark Code (BMC)**, utilizzato nel protocollo **S/PDIF (Sony Philips Digital Interface)**. In questa codifica il **clock** viaggia ad una frequenza doppia di quella dei dati, ogni bit di informazione viene rappresentato con due bit:

- 00 e 11 (una permanenza) rappresentano il valore zero
- 01 e 10 (una variazione) rappresentano il valore uno

la scelta tra le due alternative di rappresentazione viene fatta in modo da avere sempre una variazione tra un simbolo di ingresso e l'altro.



Questa rappresentazione offre due vantaggi ausiliari

- è indipendente dalla polarità (semplificando il cablaggio)
- se i simboli di ingresso sono qui probabili il valor medio del segnale in uscita è nullo e quindi la componente continua è assente.

Vediamo adesso quali possono essere i problemi che sorgono quando si usano queste tecniche di trasmissione digitale. Anche a questo proposito è necessario fare una distinzione.

Problemi nel trasferimento digitale

Il caso più tranquillo è quando un segnale digitale viene trasferito da un sistema di memorizzazione digitale ad un altro (per esempio da un **hard-disk** ad un altro, da un **hard-disk** alla **memoria** o ad un **buffer**, da **DVD** ad **hard-disk**, ecc.) Essendo il segnale finale privo di **clock** l'unico problema è accertarsi che i bit dei dati siano stati trasmessi correttamente.

Se i bit nel supporto di arrivo sono gli stessi di quelli del supporto di partenza la trasmissione è avvenuta regolarmente e non vi è alcun degrado.

- Se il protocollo di trasmissione è **asincrono** (come per esempio nei trasferimenti di file da disco a disco) i dati possono essere trasmessi in pacchetti insieme a bit di controllo o di correzione di errore e se il trasferimento di un pacchetto non va a buon fine l'operazione può essere ripetuta.
- Se il protocollo di trasmissione è **sincrono** allora l'operazione non può essere ripetuta e nel caso peggiore alcuni bit possono essere alterati o addirittura alcuni pacchetti perduti.

Questo tipo di errori, nel caso di segnali audio, sono udibili solo se colpiscono un numero elevato di campioni consecutivi.

Problemi nello streaming con conversione DA

Molto più critico è il caso in cui il trasferimento è orientato all'ascolto immediato dei campioni. Inserire un capiente buffer dopo il ricevitore fa ricadere nel caso precedente e rappresenta sempre la soluzione principe anche se il ritardo introdotto dal buffer (tempo di latenza) può essere inaccettabile in alcune applicazioni professionali.

Altrimenti vi sono tre tipi di possibili problemi

- **Perdita di sincronismo**

Se il segnale è molto sporco (a causa di cattivo cablaggio, interferenze, errato adattamento di impedenza, bassa qualità delle apparecchiature) il ricevitore può non essere capace di agganciare il **clock** e quindi non vi è conversione di segnale audio.

- **Irregolarità di clock**

Le inevitabili irregolarità di **clock** sui dati digitali possono trarre in inganno il **PLL** e fargli ricostruire un clock affetto da **jitter**.

- **Deformazioni**

Le deformazioni del segnale possono alterare il valore di qualche bit in transito. Anche in questo caso il fenomeno è avvertibile se è frequente e colpisce molti campioni consecutivi.

Conclusioni

Tutti i problemi legati alla trasmissione digitale divengono tanto più evidenti quanto maggiore è il data-rate. Per questa ragione se le apparecchiature non sono di elevatissima qualità un campionamento ad una frequenza inferiore può dare migliori risultati all'ascolto. In particolare la frequenza di campionamento a **192 KHz** è già molto critica, a livello di apparecchiature consumer dà spesso risultati peggiori di quella a **96 KHz** e in ambito professionale si preferisce farla viaggiare su due linee distinte a **96 KHz**.

Quando si deve far lavorare insieme apparecchiature separate la soluzione più robusta e sicura è far viaggiare un unico clock di qualità (**word clock**) su linee dedicate in modo che la sincronizzazione sia garantita.

Il Jitter nei supporti fisici

Spesso si parla di **jitter** anche nel caso delle irregolarità dei **pit** nelle incisioni su CD, in particolare nelle masterizzazioni domestiche.

Questa terminologia è decisamente impropria in quanto in un supporto statico il **clock** è **assente** e pertanto **non può essere affetto da irregolarità**.

Questo approccio linguistico trova però giustificazione in quanto le irregolarità dei **pit**, nelle apparecchiature di infima qualità si possono trasformare in irregolarità del clock in uscita dalla sezione di lettura.

Se le irregolarità superano invece una ragionevole soglia di tolleranza, più che di problemi di **jitter** si dovrebbe parlare di **disco difettoso “da buttare”**.