

2

Conversione A/D e D/A

Abbiamo visto come il **Teorema del Campionamento** assicuri, almeno in teoria, la rappresentabilità digitale di funzioni continue. In particolare parole l'operazione di campionamento non introduce errori se la funzione originale è opportunamente limitata in banda. Vediamo ora come la teoria può essere messa in pratica ovvero come si effettua la conversione **analogico-digitale (A/D)** e **digitale-analogica (D/A)**.

Quantizzazione

Il campionamento come lo abbiamo introdotto nella precedente puntata è solo una astrazione teorica in quanto i numeri reali con cui opera l'analisi matematica prevedono un numero infinito di cifre. In pratica non è possibile evitare di far seguire al campionamento un fase di **quantizzazione**, ovvero la rappresentazione del campione con una quantità finita di informazione. Di solito si decide di rappresentare tutti i campioni come numeri **interi** binari con un numero finito di **bit**; talvolta però, specialmente all'interno di programmi di elaborazione, i campioni possono essere trattati anche come numeri **in virgola mobile**

Il numero di **bit** usati nella quantizzazione dipende essenzialmente da due fattori,

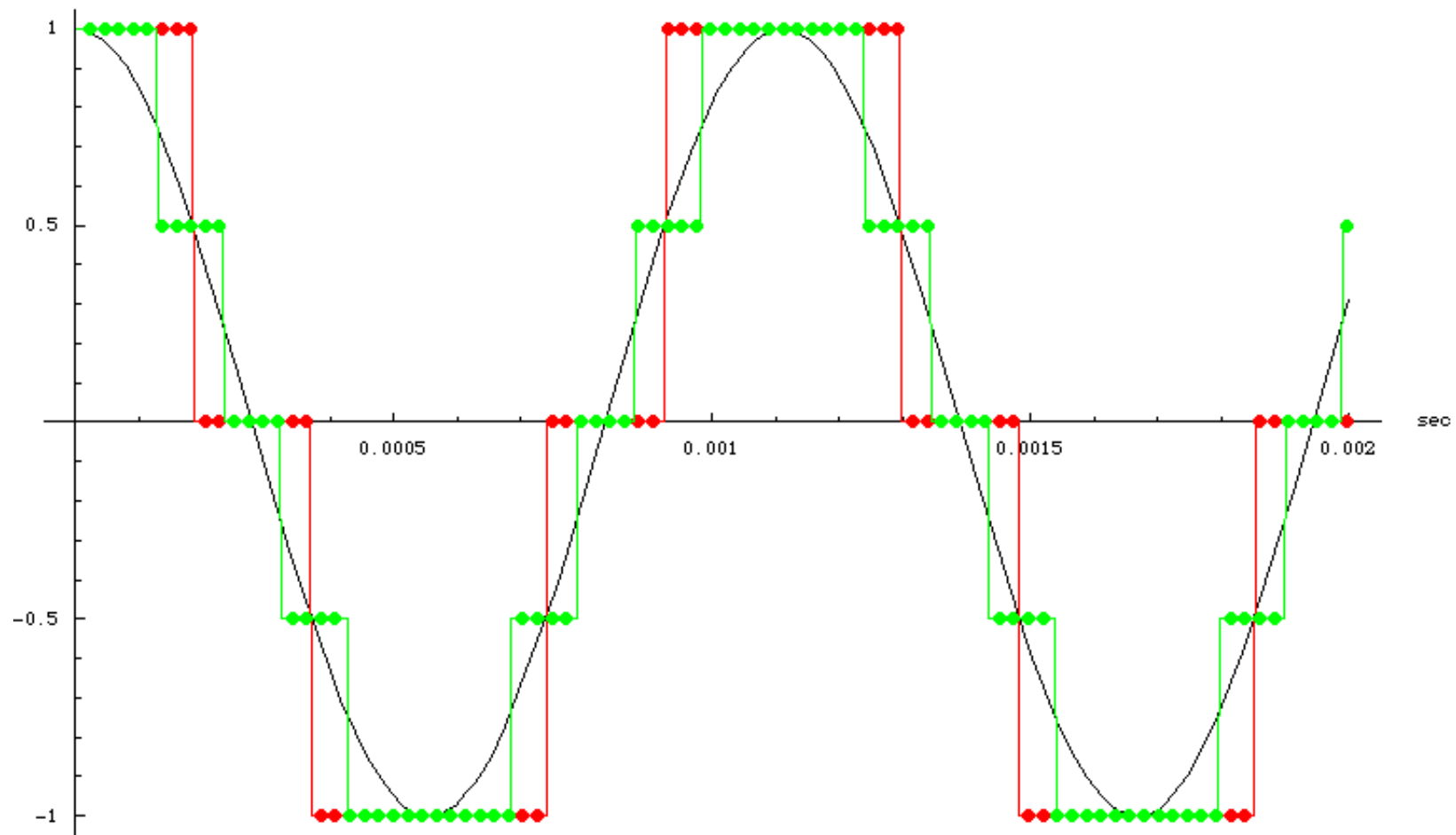
- il costo e la disponibilità di convertitori **A/D** capaci di trattare parole di quella lunghezza
- l'occupazione di memoria risultante dopo il campionamento.

Anche se si fosse disposti a memorizzare file audio con **64** bit di lunghezza di parola dovremmo certamente arrenderci di fronte alla impossibilità fisica di realizzare convertitori **D/A** con quella precisione (come minimo tutta l'apparecchiatura, ascoltatori compresi, dovrebbe lavorare a **-270** gradi centigradi per ridurre il rumore termico).

La tabella seguente mostra l'occupazione di memoria in **Megabyte** di 1 minuto di musica stereo nei vari formati, in grassetto sono evidenziati i valori adottati per i nuovi standard. Si nota come mentre l'aumento della frequenza di campionamento è molto costoso, l'aumento della profondità di quantizzazione è decisamente più economico, per esempio il passaggio da **16** a **24 bit** spazza via una miriade di problemi e costa solo un fattore **1.5**, sarebbe stato demenziale usare per i nuovi formati una profondità di **20 bit**.

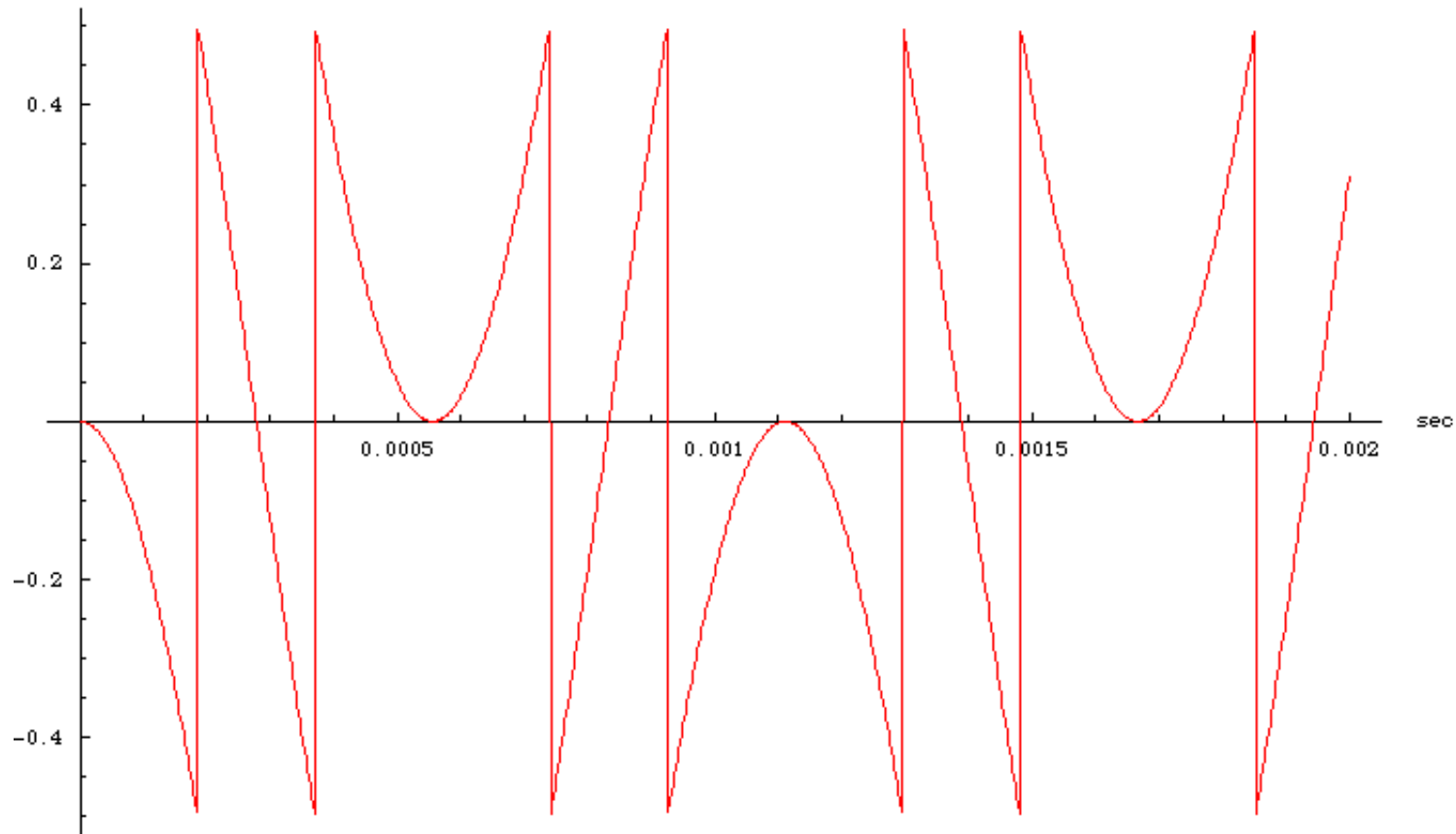
	44100 Hz	48000 Hz	88200 Hz	96000 Hz	176400 Hz	192000 Hz
16 bit	10.09	10.99	20.19	21.97	40.38	43.95
20 bit	12.62	13.73	25.23	27.47	50.47	54.94
24 bit	15.14	16.48	30.28	32.96	60.56	65.99

Che errore si commette ad approssimare il campione con un numero finito di bit?. Guardando la situazione nel dominio del tempo si va poco lontano. In figura è rappresentata una funzione sinusoidale (un tono a **0dB** e **900Hz**) e le sue approssimazioni ad **1 bit** e a **2 bit** dopo un campionamento a **44100Hz**. I punti colorati rappresentano il risultato dopo un campionamento e la quantizzazione. È utile dal punto di vista teorico immaginare di fare solo l'operazione di quantizzazione senza il campionamento, il risultato è una funzione continua che nel disegno è rappresentata dalle linee rossa (per **1 bit**) e verde (per **2 bit**).



Una funzione sinusoidale (in nero) e i valori campionati e quantizzati a 1 bit (in rosso) e 2 bit (in verde). Le linee continue in rosso e verde rappresentano una ideale funzione quantizzata ma non campionata.

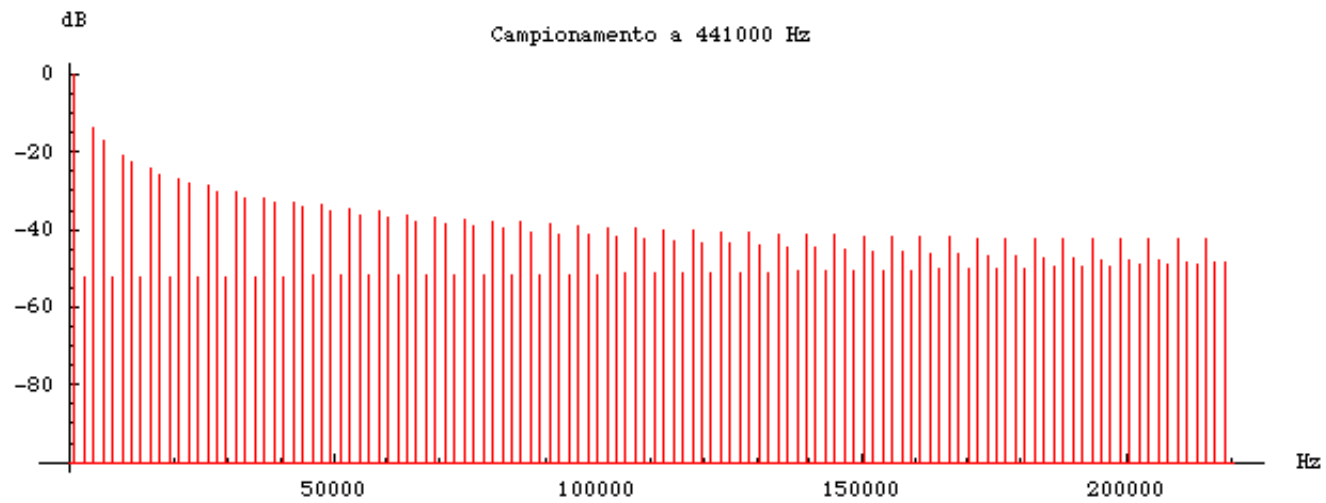
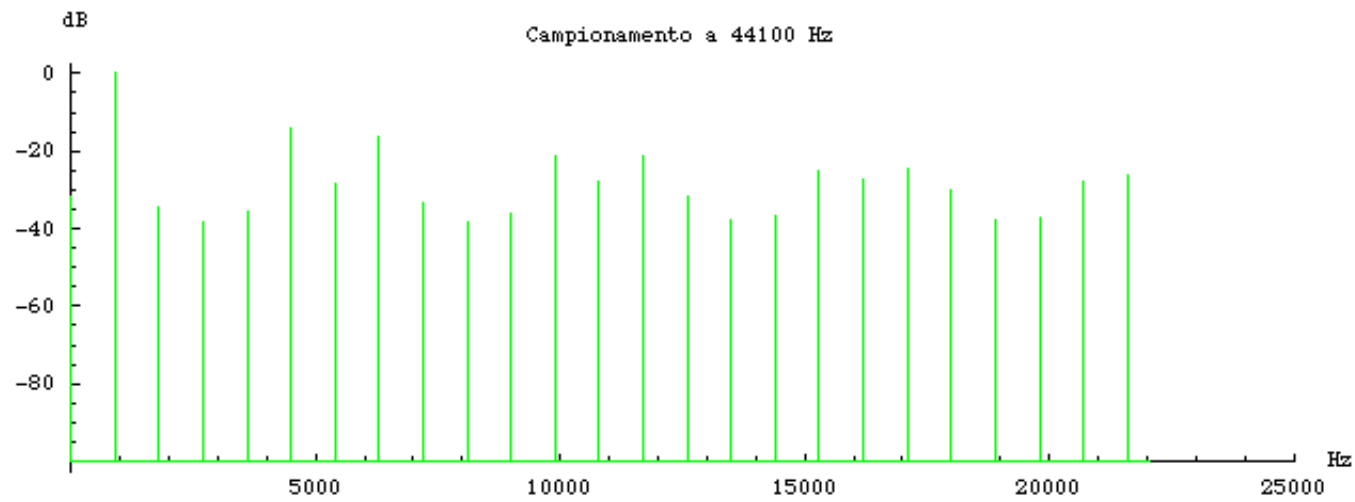
Facendo la differenza tra la funzione solo quantizzata e la funzione originale si ottiene una funzione continua che rappresenta l'errore, la caratteristica principale dell'errore di quantizzazione è di essere una funzione ricca di spigoli, questo significa che gran parte della sua potenza è distribuita nelle frequenze elevate.



Errore di quantizzazione ad **1 bit** per una funzione a **1KHz**.

È fondamentale a questo punto notare che anche se il segnale da rappresentare è stato filtrato passa basso prima della digitalizzazione lo spettro della funzione quantizzata non può essere limitato in frequenza perché gli errori non lo sono. Quindi, per il teorema del Campionamento, queste componenti ad alta frequenza vengono ribattute sotto la frequenza di Nyquist sotto forma di aliasing. Passando nel dominio della frequenza si riesce a vedere come stanno le cose.

Se facciamo una rappresentazione del segnale quantizzato ad un bit dopo un campionamento a **44100** e a **441000** si vede come nel primo caso il rumore venga spalmato solo in banda audio mentre nel secondo sia distribuito fino a **220500 Hz**. Nel secondo caso (puramente didattico) si vede bene lo spettro della funzione quantizzata e non campionata e come questo venga ribattuto alla frequenza di Nyquist.



Spettro del segnale quantizzato ad 1 bit per una funzione a 1KHz, campionamento a 44100 Hz (in verde) e 441000 Hz (in rosso)

Queste considerazioni teoriche si riflettono nei seguenti fatti che hanno un'influenza determinata nella qualità finale del suono digitale.

- Più alta la profondità di quantizzazione minore è la potenza totale del rumore digitale.
- Più alta è la frequenza di campionamento più il rumore si distribuisce ad alta frequenza. Il rumore fuori della banda audio può venire eliminato in un secondo tempo ed è influente all'ascolto.
- In genere il rumore digitale è correlato con il segnale. Nel nostro esempio il rumore ha componenti spettrali discrete perché nel dominio del tempo è una funzione periodica come il segnale originale.

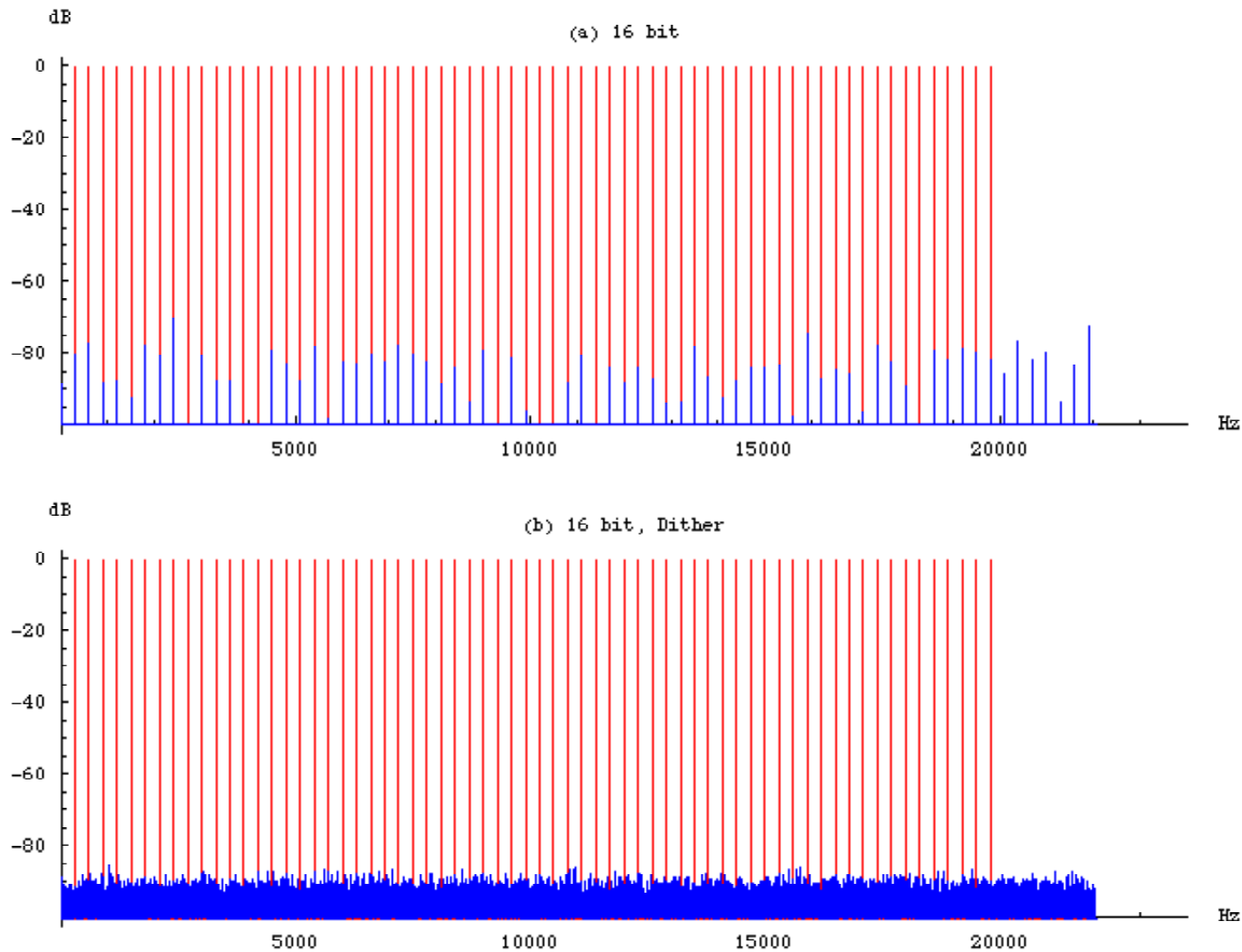
Teoria della Conversione A/D

Questi sono i problemi intrinseci dell'audio digitale come le asperità e il consumo del disco sono i problemi intrinseci del **LP**.

Ma a differenza dei **LP** la cui tecnologia non è migliorabile più di tanto (e per questo i giradischi nuovi, allo stato dell'arte, costano cifre pazzesche) ai problemi suddetti è facile trovare soluzioni economiche.

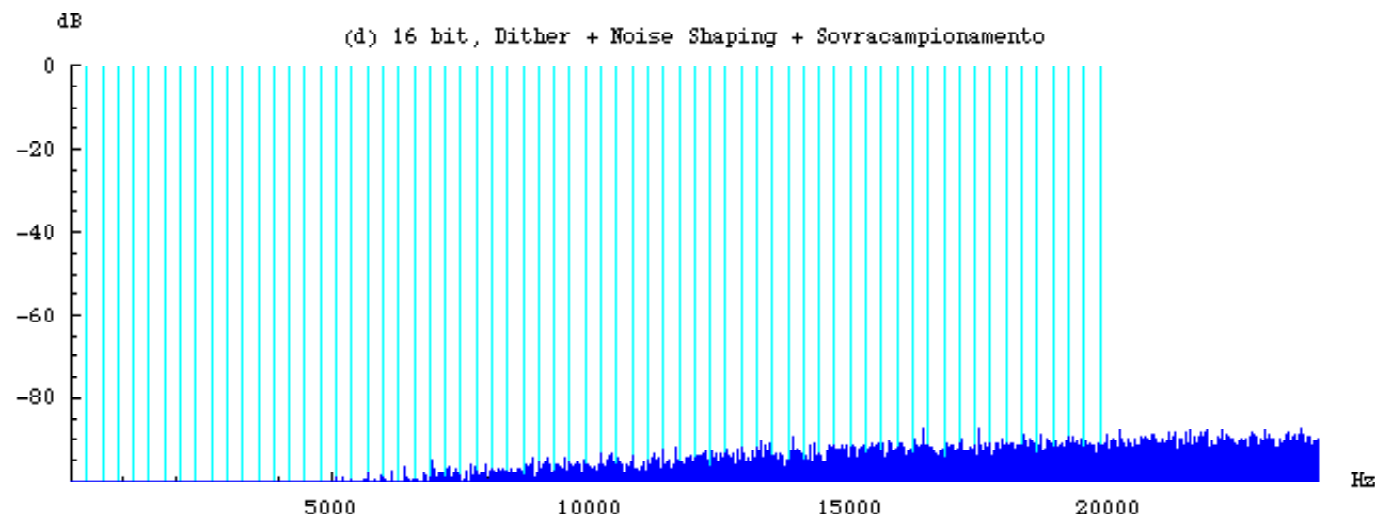
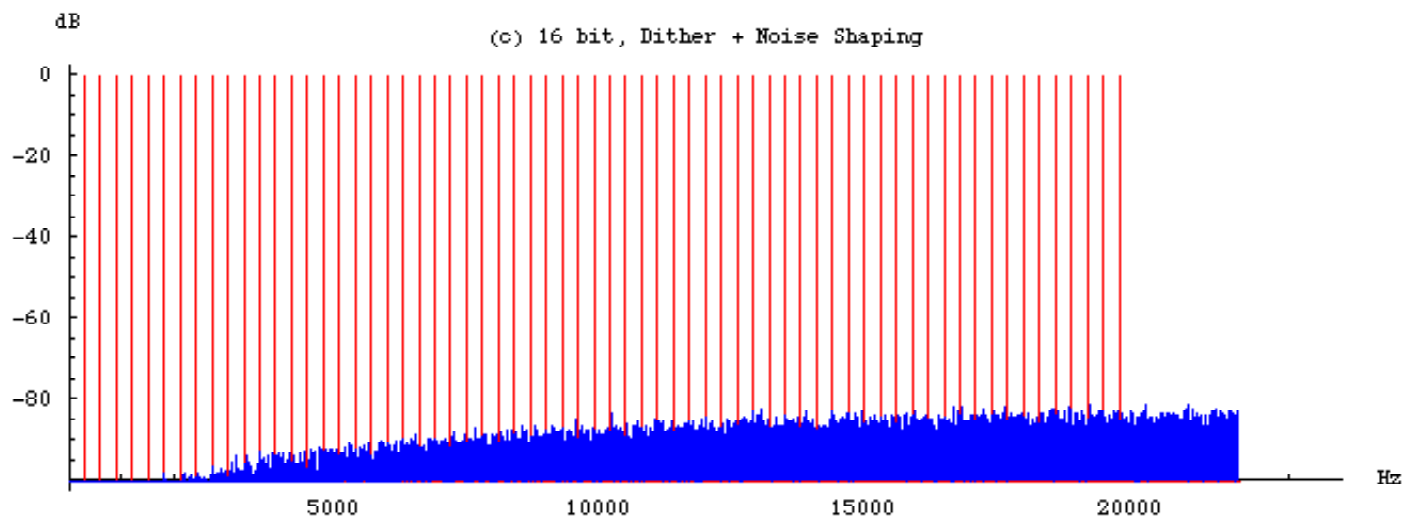
- Usare **24** bit invece che **16** porta i livelli di rumore digitale sotto l'inevitabile rumore termico dei componenti elettronici e li rende trascurabili (o per lo meno sposta il problema nella costruzione dei convertitori **A/D** di qualità).
- Effettuare il campionamento ad una frequenza più elevata di quella finale permette di filtrare via buona parte del rumore di quantizzazione (**conversione A/D con sovracampionamento**)
- Per scorrelare il rumore dal segnale basta iniettare una perturbazione casuale e di bassissimo livello al momento della quantizzazione (**aggiunta di dither**)
- La matematica pone dei vincoli alla potenza totale di rumore associata ad un determinato livello di quantizzazione. È però possibile alterare la distribuzione del rumore sbattendolo ad alta frequenza dove l'orecchio è meno sensibile e quindi rendendolo meno udibile (**noise shaping**). Questa operazione è molto più efficace se viene associata al sovracampionamento in quanto gran parte del rumore esce così dalla banda audio.

Vediamo un segnale multitono **300Hz-20KHz** (in rosso) e il suo rumore di quantizzazione a **16bit/44100Hz** (in blu) se lo stesso segnale con discretizzato con l'aggiunta di *dither*, l'effetto è una spalmatura del rumore che lo rende scorrelato.



Segnale multitono **300Hz-20KHz** ed errore numerico
(a) quantizzazione a 16bit/44100Hz, (b) idem con aggiunta di dither.

Se oltre al *dither* è applicato anche un *noise-shaping* del primo ordine aumenta il rumore ad alta frequenza a tutto vantaggio delle frequenze inferiori. Infine se la stessa operazione fatta a **88200Hz** è evidente come il rumore digitale si distribuisca in gran parte fuori dalla banda audio.



Segnale multitono **300Hz-20KHz** ed errore numerico (c) con aggiunta di dither e noise shaping del primo ordine, (d) quantizzazione a **16bit/88200Hz** con aggiunta di dither e noise shaping del primo ordine.

Questi esperimenti sono stati fatti con l'algoritmo più semplice possibile per il noise shaping ed hanno valenza solo didattica. Soluzioni molto più evolute sono state trovate e brevettate e sono disponibili commercialmente. La Sony usa una tecnica chiamata **Super Bit Mapping** che usa nella digitalizzazione del vecchio materiale analogico. Forse la tecnica migliore, molto usata in ambito professionale, è la **UV22** disponibile sia in hardware (il convertitore Apogee) che in software (programmi per **PC**).

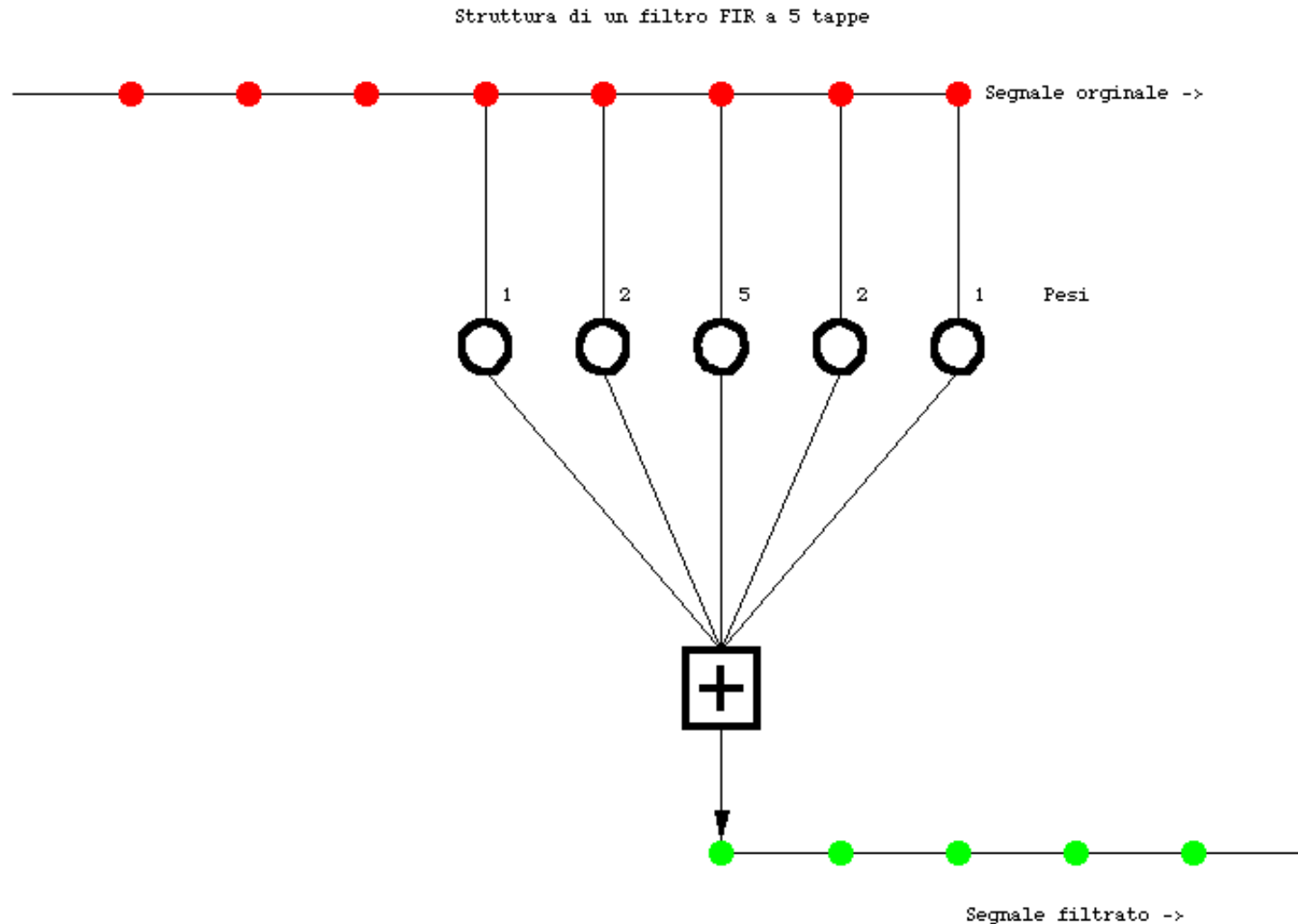
Una conseguenza molto interessante è che oggi la registrazione allo stato dell'arte è facilmente alla portata dei dilettanti evoluti. Mentre ai tempi dei Beatles uno studio di registrazione top-level costava probabilmente come un palazzo nel centro di Roma, ora al costo di una moto di grossa cilindrata si possono fare registrazioni praticamente perfette, sicuramente migliori della media di quelle in commercio.

Alcuni dettagli di questi procedimenti verranno trattati in una prossima puntata dedicata alle caratteristiche dei vari formati e alla conversione tra essi, qui ci limitiamo a notare che una volta finito il procedimento di campionamento con *oversampling*, quantizzazione, *noise shaping* e riduzione al formato **CD** il file **non deve essere più manipolato**, basta infatti una operazione di filtraggio o normalizzazione per perdere tutti i vantaggi nella distribuzione del rumore così faticosamente ottenuti.

Filtri digitali

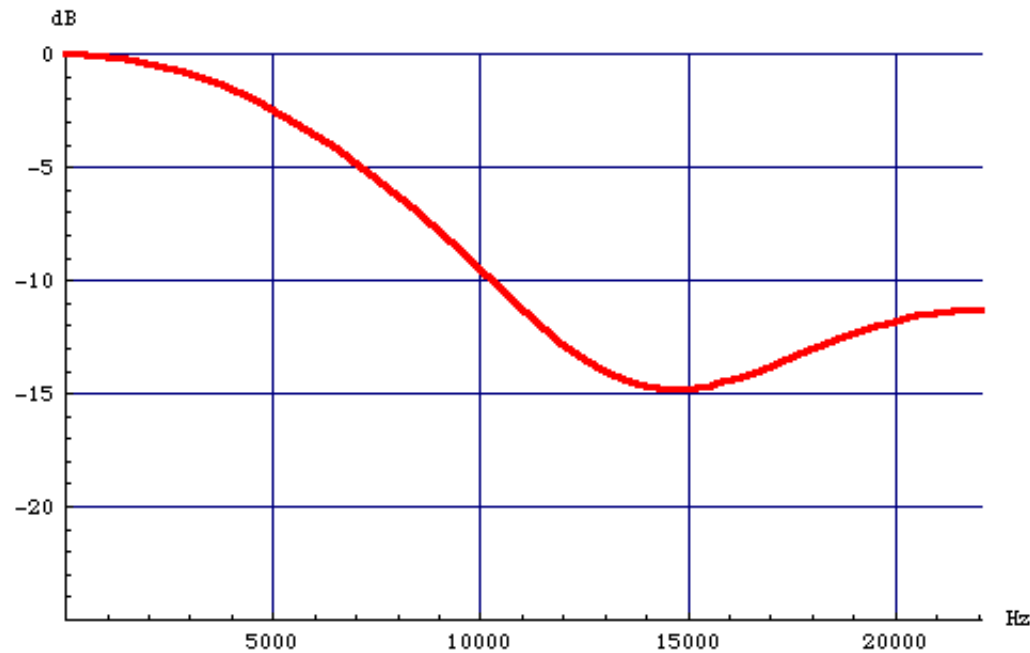
I filtri digitali permettono di manipolare un segnale digitale alterando il suo spettro. Poiché i filtri digitali sono una trasformazione lineare e invariante nel tempo il loro effetto può essere studiato in modo semplice.

La prima classe di filtri digitali è costituita dai filtri **FIR (Finite Impulse Response)** che generano una nuova sequenza di campioni con una combinazione lineare di un gruppo di campioni consecutivi.



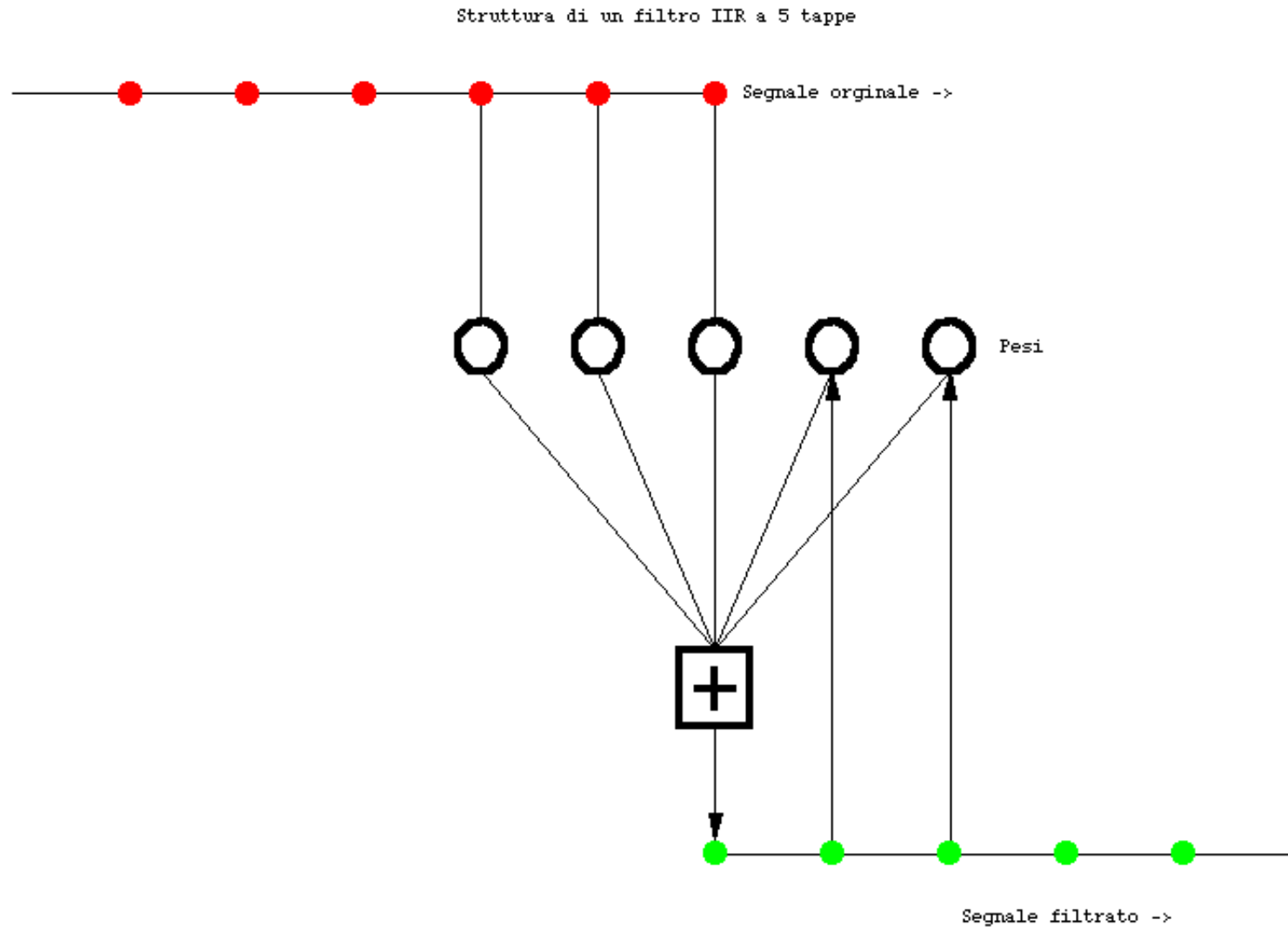
Un filtro **FIR** simmetrico, a 5 tappe.

Se i pesi della combinazione lineare sono reale e simmetrici (per esempio 1,3,5,3,1) il filtro ha funzione di trasferimento reale e simmetrica e non introduce alterazioni di fase. la risposta di un **FIR** si può calcolare per via teorica



La risposta in frequenza del filtro precedente.

Esiste anche una altra categoria di filtri digitali I filtri **IIR (Infinite Impulse response)** che hanno un comportamento che somiglia di più (nel bene e nel male) alle reti analogiche. Non sono lineari in fase e matematicamente corrispondono ad un'approssimazione con funzioni razionali, in questo contesto non vale la pena di dire altro.



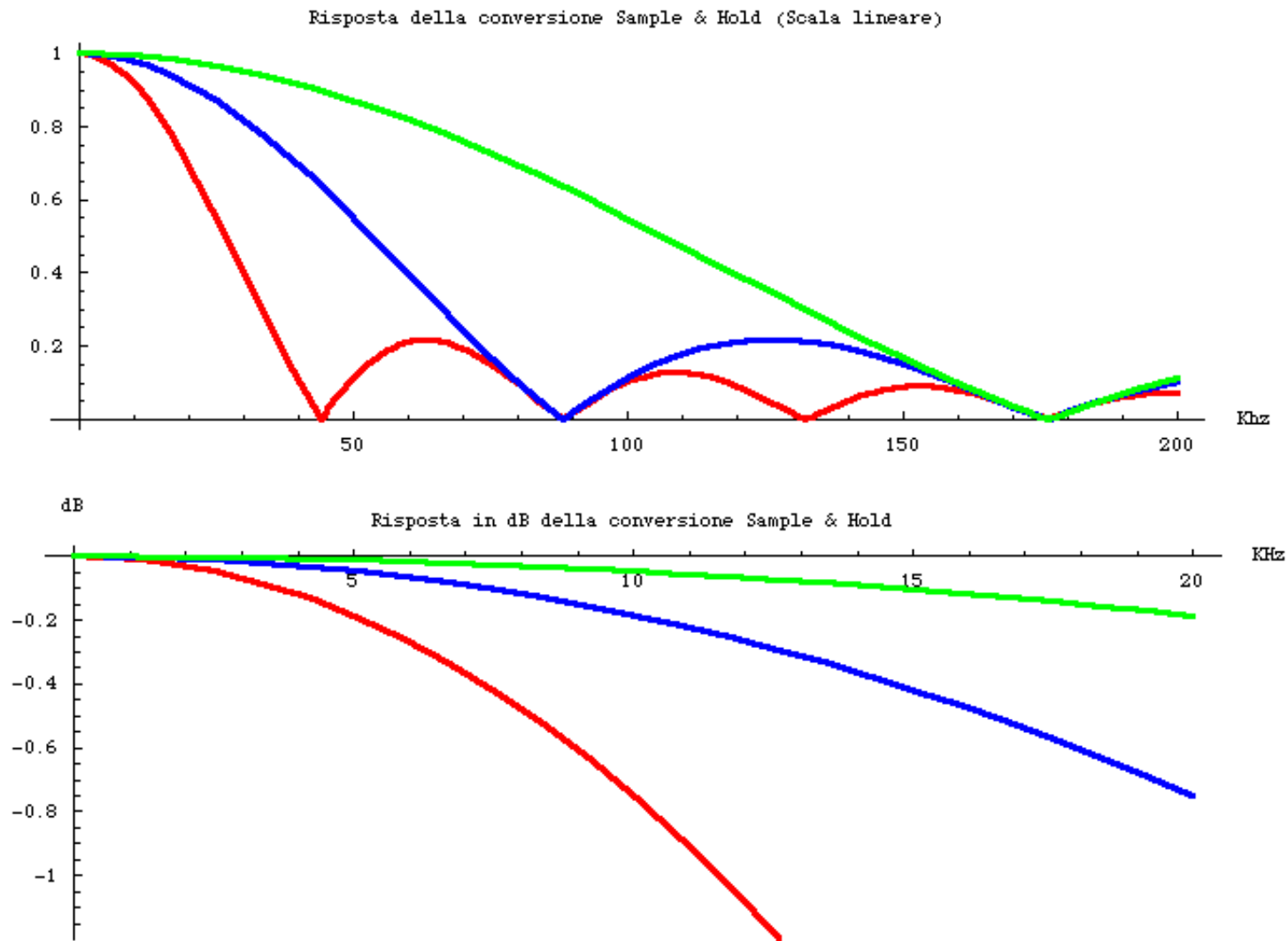
Esempio di filtri IIR.

Nel calcolo dei filtri digitali si può lavorare con un numero elevato di bit praticamente senza errore (se si lavora a **32** bit l'errore numerico è trascurabile rispetto a quello di quantizzazione (a **16** o **24** bit). La costruzione di un buon filtro è un'arte (come la costruzione di un buon trasformatore per un'amplificatore a valvole) c'è da dire però che nei trasformatori la qualità dei materiali è essenziale e il migliore di essi costa cento volte di più del peggiore. Invece, a parità di numero di pesi, un buon filtro **FIR** e uno pessimo costano esattamente la medesima cifra.

Conversione D/A

Una volta ottenuto il segnale digitale questo viene memorizzato ed eventualmente elaborato, ma prima o poi sorge il problema di ascoltarlo. Per fare questo, almeno fino a quando non inventeranno altoparlanti in grado di accettare direttamente un input digitale, è necessario trasformare il segnale in analogico prima della fase di amplificazione di potenza.

Un singolo campione digitale è un numero, per trasformarlo in un segnale continuo è possibile associarvi un impulso rettangolare di altezza pari al suo valore e di durata predeterminata. Questa operazione detta **Sample & Hold** che può essere eseguita in pratica con dispositivi elettronici, dal punto di vista matematico è una operazione di interpolazione che ha una sua ben precisa risposta in frequenza. Per esempio in figura si vede la risposta della conversione **S&H** per un segnale campionato a **44100Hz** e durata dell'impulso pari rispettivamente al **100%** (rosso) al **50%** (blu) e al **25%** (verde) della distanza tra i campioni. La risposta dipende solo dalla forma dell'impulso per cui la curva blu è anche la risposta di un **S&H** con frequenza **88200Hz** e durata del **100%** e la curva verde è anche la risposta di un **S&H** con frequenza **88200Hz** e durata del **50%** oppure frequenza **176400Hz** e durata del **100%**. Si nota come la curva rossa presenti una attenuazione di qualche **dB** in banda audio che certamente non è accettabile per una riproduzione di qualità.



Risposta in scale lineare e logaritmica della conversione Sample & Hold per tre diverse lunghezze dell'impulso rettangolare.

Quasi ogni tecnica di conversione D/A può essere schematizzata in tre fasi:

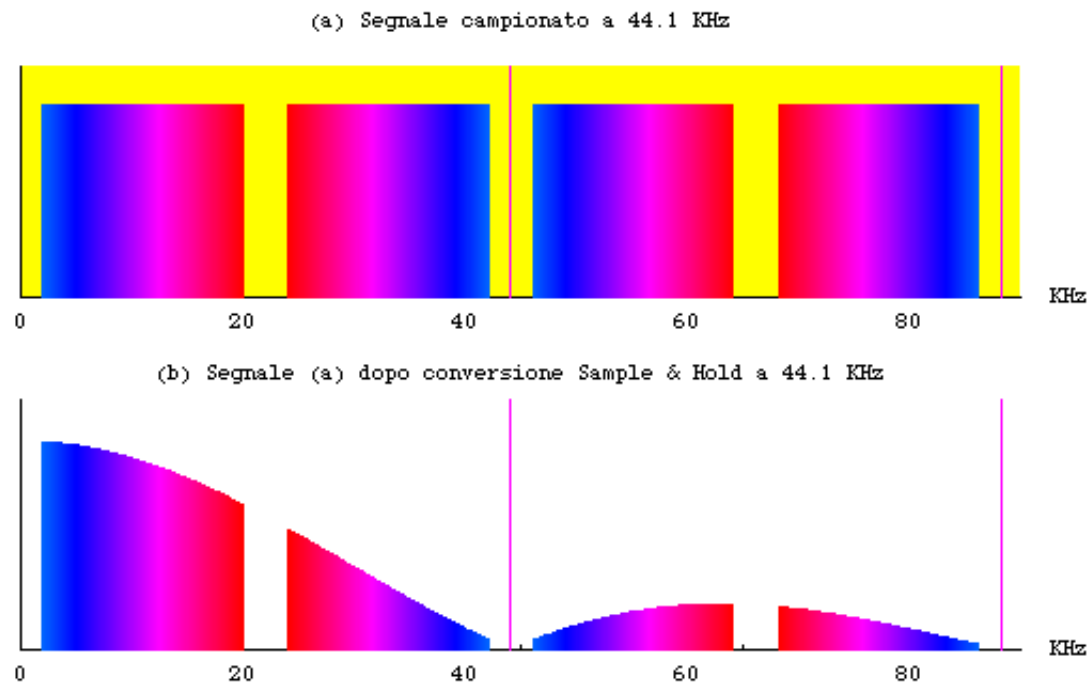
- 1) preprocessing digitale;
- 2) interpolazione Sample & Hold;
- 3) post processing analogico.

Questo vale almeno dal punto di vista matematico anche se vedremo ci possono essere differenti tipi di implementazione.

Il primo caso che presentiamo è quello della “**tecnica primordiale**” usata nelle apparecchiature (soprattutto giapponesi) di primissima generazione

- 1) nessun preprocessing digitale;
- 2) conversione D/A 16 bit;
- 3) passa basso ad alta pendenza.

Nella figura seguente si vede come un segnale digitale a **44100Hz (a)** viene trasformato in analogico da una conversione **S&H** con impulsi di durata **100%**. Il segnale in **(b)** ha una forte componente ultrasonica che deve essere pesantemente filtrata con tecniche analogiche. Questa operazione introduceva forti rotazioni di fase che erano una delle cause principali del cattivo suono dei primi CD player.



Spettro del segnale digitale e del segnale analogico dopo una conversione Sample & Hold.

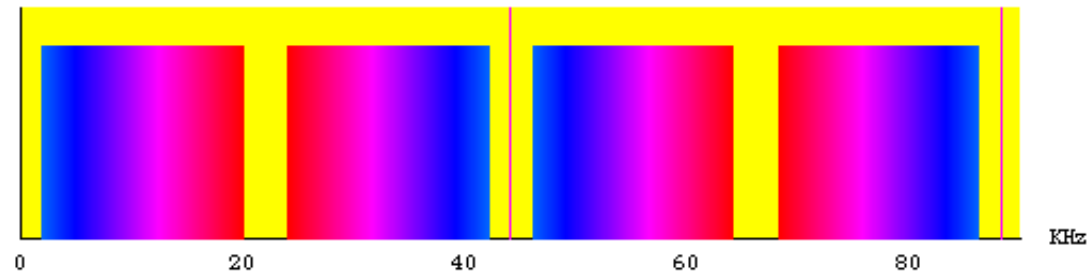
Qualcuno adesso ha riscoperta questa tecnica (con la scusa di ridurre al minimo le manipolazioni nel digitale). I casi sono due: o non c'è sufficiente filtraggio analogico e allora si esce con pericolose componenti ultrasoniche, oppure il filtro analogico influenza il risultato sonico finale. Probabilmente se il filtro è fatto bene le colorazioni introdotte possono essere piacevoli e le scelte di progetto hanno certamente tenuto conto che l'apparecchio in questione ha un'uscita a valvole e sarà presumibilmente seguito da una catena a valvole.

Una tecnica molto usata, introdotta per la prima volta dalla Philips (mi pare con il modello **CD104**) è quella del **Sovracampionamento (oversampling)**

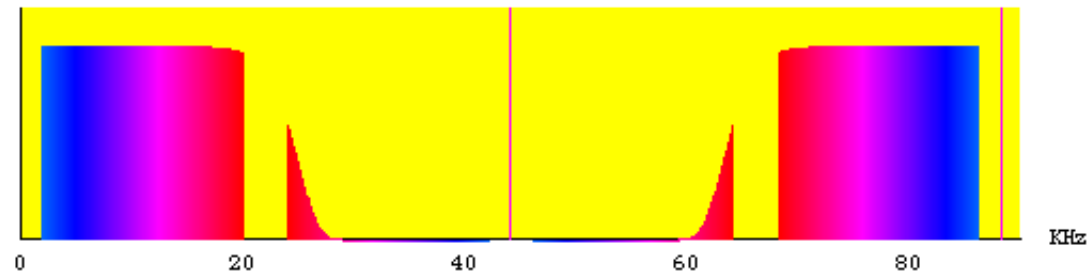
- 1) aumento della frequenza di campionamento mediante inserzione di zeri e successivo filtraggio passa basso
- 2) conversione **D/A** multibit
- 3) filtro analogico a bassa pendenza

L'idea che sta alla base di questo procedimento è quella di spostare le operazioni di filtraggio nel campo digitale dove, usando un **FIR**, non si introducono alterazioni di fase. La prima parte del procedimento consiste nell'inserire un certo numero di zeri tra un campione e l'altro. Per esempio se si inserisce uno zero ogni campione la frequenza di campionamento viene moltiplicata per 2 e lo spettro del segnale digitale rimane esattamente lo stesso **(c)**. A questo punto c'è spazio per un filtraggio digitale passa basso che elimina gran parte delle componenti indesiderate **(d)** Il passaggio all'analogico con un convertitore **S&H** a **88100Hz** produce il segnale di **(e)** che può essere trattato in modo molto più agevole con un blando filtraggio passa banda.

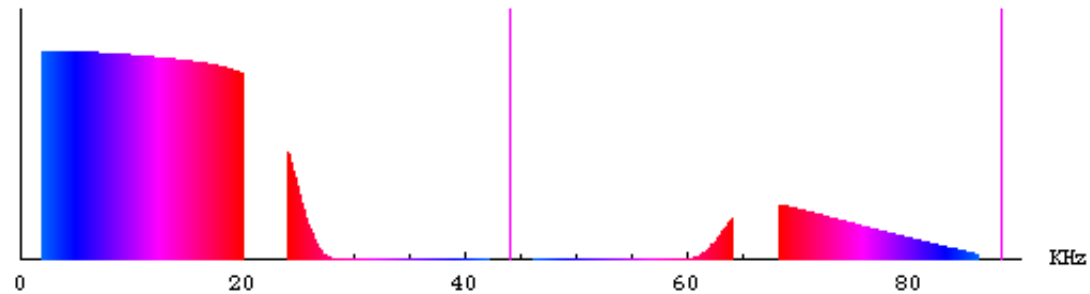
(c) Segnale (a) dopo inserzione zeri



(d) Segnale (c) dopo filtraggio digitale



(e) Segnale (d) dopo conversione Sample & Hold a 88.2 KHz



Spettro del segnale digitale e del segnale analogico dopo un sovracampionamento 2x un filtraggio passa basso digitale e la conversione Sample & Hold.

La Philips nei suoi primi CD player usava un sovracampionamento **4x**, un filtraggio passa basso operante a **28 bit** e una riduzione a **14** con associato noise-shaping. Questo permetteva di usare convertitori a **14 bit**, più economici di quelli a **16** che a quei tempi erano costosi e non molto affidabili. Successivamente questa tecnica si è evoluta usando fattori di oversampling anche maggiori (per esempio **8x**) e convertitori sempre più raffinati (**18bit, 20bit, 24bit**) montandone spesso più di uno in parallelo per ridurre (mediandolo) il rumore generato dalle imprecisioni nella conversione, probabilmente è questa la strada che permette di raggiungere lo stato dell'arte nella riproduzione dei CD ma una implementazione corretta è molto costosa.

Vi sono altre tre famiglie di tecniche di conversione degne di nota:

Conversione a 24 bit 96Khz (standard DVD)

- 1) conversione di frequenza da 44100 a 96000 con estensione della parola a **24 bit**.
- 2) convertitore **D/A 24 bit**
- 3) passa basso a bassa pendenza

Questa tecnica che spesso viene spacciata come “**ad alta qualità**” ha l'unico vantaggio rispetto al sovracampionamento di un fattore intero di poter utilizzare la stessa circuiteria dei **DVD** audio risparmiando sui costi di progettazione e montaggio.

Conversione a 1 bit et similia (Pulseflow, Mash, etc)

- 1) sovracampionamento elevatissimo e riduzione a 1 bit con noise-shaping multistadio e filtraggio passa basso digitale
- 2) convertitore **D/A 1 bit**
- 3) passa basso a bassa pendenza

Questa tecnica (di cui parleremo in dettaglio quando presenteremo il formato **SACD** a cui ha poi dato origine) dovrebbe risolvere alcuni problemi della conversione **D/A multibit** (distorsione di passaggio per lo zero) e si presta bene ad essere integrata a basso costo risultando quindi particolarmente adatta alle realizzazioni economiche anche se non mancano le implementazioni di pregio.

Trattamento nel dominio del tempo

- 1) sovracampionamento con interpolazione numerica nel dominio del tempo (e.g. spline cubiche)
- 2) convertitore **D/A 16-24 bit**
- 3) passa basso a bassa pendenza

Questa tecnica venne presentata in implementazioni di grande prestigio (anche in questo caso) spacciandola per una grande innovazione rispetto al sovracampionamento per inserzione di zeri. È banale però dimostrare matematicamente che l'interpolazione numerica nel dominio del tempo è equivalente all'inserzione di zeri seguita da un filtraggio passa basso digitale **con l'unica differenza di essere meno versatile**. Allora perché quelle costosissime macchine suonavano così bene rispetto alla normale produzione giapponese ed europea. Erano un imbroglio? Non lo so, non ho idea del progetto vero, e certamente poteva esserci qualcosa di più e di diverso di quello decantato dalla pubblicità; inoltre la qualità costruttiva (che è quello che si paga veramente) era molto elevata e questo ha sempre avuto una notevole influenza sul suono finale, indipendentemente dagli algoritmi utilizzati. Resta il fatto che questa tecnica, sulla carta non può dare niente di più o di meglio di quella tradizionale.

Conclusioni

Frequenze di campionamento elevate (per esempio **96KHz**) **NON** servono a riprodurre segnali a frequenza superiore a **20KHz** (che sono comunque non udibili almeno per gli umani) ma permettono di ridurre le interferenze di tipo matematico nelle fasi di campionamento, quantizzazione, e ricostruzione e di semplificare i circuiti di conversione, soprattutto riducendo la necessità di filtri analogici ad alta pendenza, (probabilmente la componente più pericolosa per il suono di tutta la catena digitale).

Si noti che non c'è una correlazione precisa tra i bit effettivi (che rappresentano una possibile misura del rumore totale) e la bontà del CD player stesso valutata in termini di qualità musicale, valore della costruzione etc. È da notare che essendo il segnale di partenza a **16bit/44100Hz** tutte le tecniche non possono introdurre maggiore informazione ma permettono di sfruttare quasi completamente l'informazione. Un'idea della bontà del sistema di conversione può essere data dalla misura della risoluzione in bit introdotta da molti anni nelle prove di Audio Review. Si misura il rumore totale in **dB** e si riporta in bit quasi fosse solo rumore di conversione.

Attenzione però: mentre una risoluzione di **15.9** bit significa sicuramente che il sistema di conversione è fatto molto bene, una risoluzione bassa può essere dovuta sia ad un progetto e/o una realizzazione carenti sia alla presenza di rumore scorrelato (magari dovuto allo stadio di uscita a valvole) e si sono visti molti casi di ottimi apparecchi, costosi e ben suonanti con una risoluzione non elevatissima.

Recentemente misure più precise permettono di avere un'idea della distribuzione reale del rumore digitale e quindi della sua udibilità e l'analisi multitono ad alta frequenza chiarisce molto il comportamento della macchina in prossimità della frequenza di Nyquist.