

7

La conversione Digitale-Analogico

Introduzione

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

NB concettualmente è possibile convertire un segnale ad 1 bit con le caratteristiche opportune con un semplice filtro passa basso e quindi un segnale digitale potrebbe alimentare direttamente uno stadio di potenza seguito dal filtro e dai sistemi di altoparlanti. Al momento questa strada non permette di raggiungere lo stato dell'arte ma offre sicuramente interessanti prospettive.

Un **convertitore Digitale-Analogico** è un dispositivo fisico che riceve in ingresso una serie di numeri che vengono trasmessi per via elettronica in forma digitale e fornisce in uscita un segnale analogico (tipicamente una tensione rapidamente variabile). Anche in questo caso per la delicatezza dell'implementazione e le complicazioni costruttive in genere tutti i convertitori sono realizzati sotto forma di **circuiti integrati** progettati ad hoc.

Naturalmente per un corretto utilizzo è necessario fornire a questi dispositivi di una tensione di riferimento costante e soprattutto un clock preciso, ogni errore su questi si può riflettere sulla qualità del risultato.

Abbiamo visto come il **Teorema del Campionamento** fornisca la formula **magica** per ricostruire il segnale analogico precedente alla digitalizzazione

$$s(t) = \Delta \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k\Delta) \frac{\sin \frac{\pi(t - k\Delta)}{\Delta}}{\pi(t - k\Delta)}$$

purtroppo questa formula non è applicabile in pratica (è una combinazione lineare di **infinite** funzioni definite su **tutta** la retta reale) ed è necessario sostituire l'interpolatore ideale basato sulla funzione **sinc** con una sua approssimazione. La soluzione più facilmente realizzabile è quella di usare un impulso rettangolare ma la risposta che ne deriva è ben lungi dall'essere ottimale e ulteriori elaborazioni divengono indispensabili.

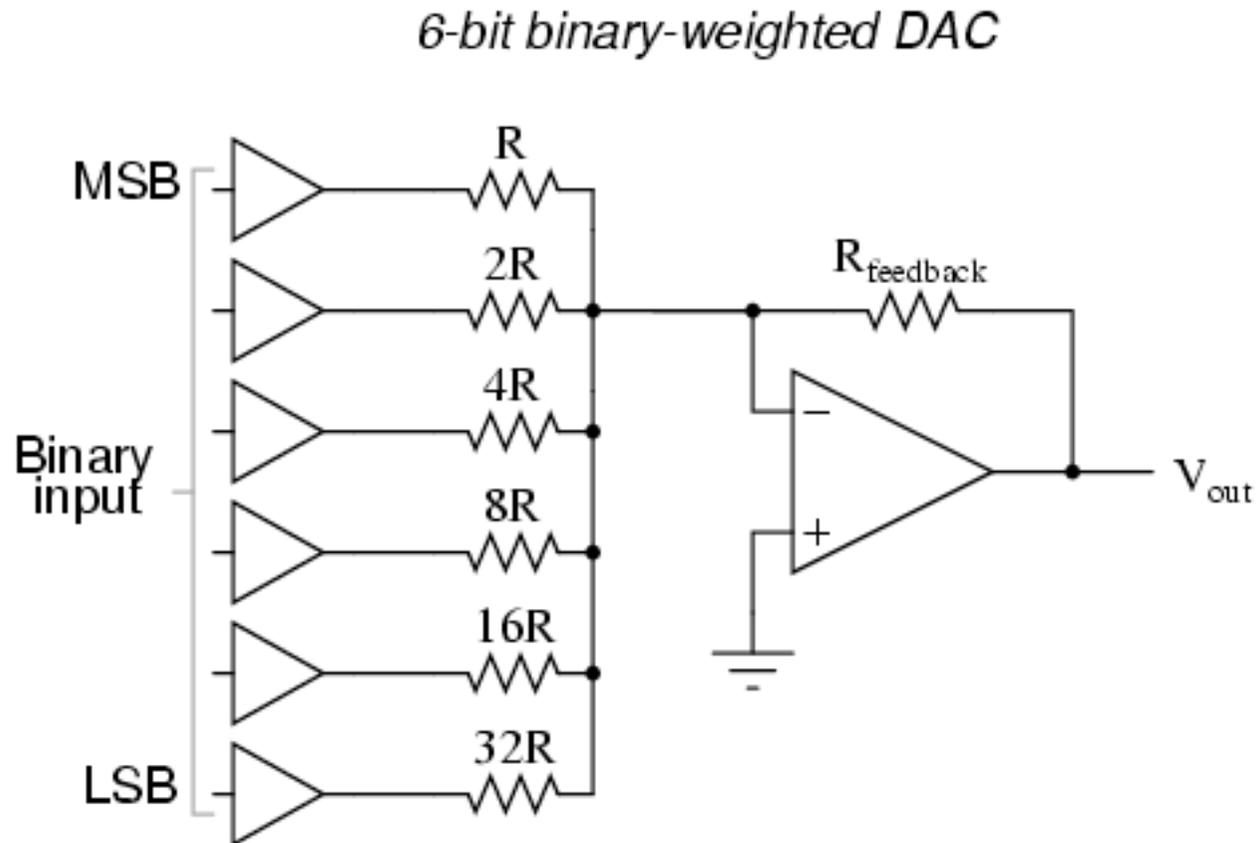
Le componenti principali di un convertitore Digitale-Analogico sono quindi

- una sezione di pre-elaborazione e filtraggio che agisce sul segnale digitale;
- un circuito elettronico di conversione che trasforma il segnale digitale in uno analogico;
- un circuito elettronico analogico che effettua la post-elaborazione e il filtraggio e fornisce all'esterno un segnale della opportuno livello e impedenza di uscita.

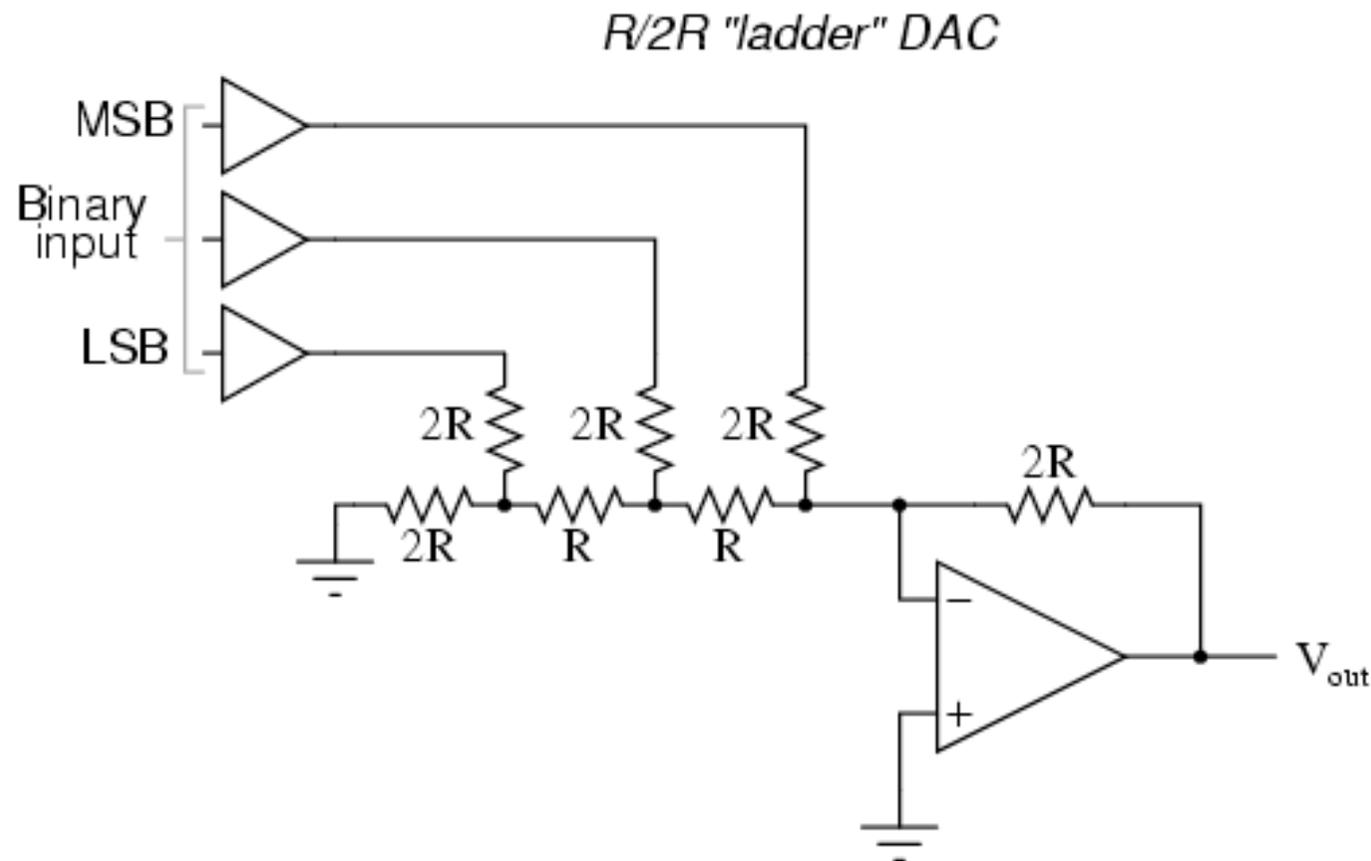
Vediamo dapprima come si può realizzare la seconda componente, ovvero il circuito di conversione vera e propria.

Circuiti di conversione

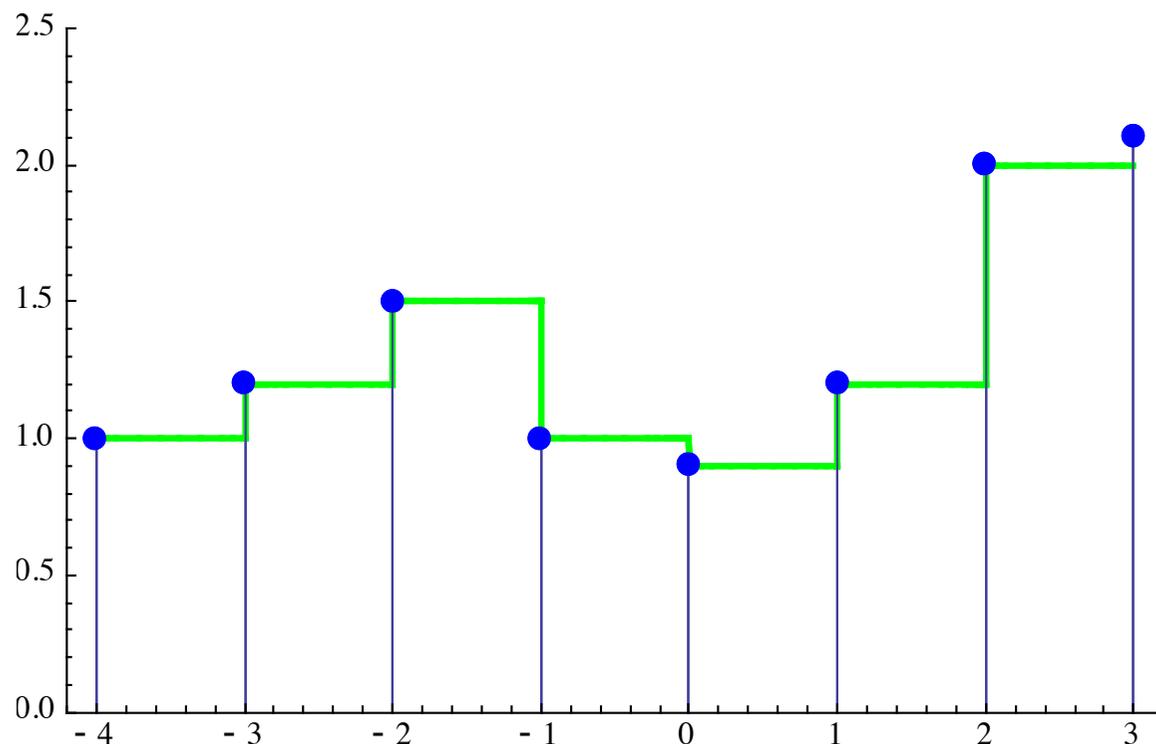
Il problema consiste nel trasformare un numero in un impulso rettangolare di lunghezza prefissata e di altezza proporzionale al numero stesso. Una prima soluzione consiste nel utilizzare in partitore resistivo con un numero di resistenze campione di valori $R, 2R, \dots, 2^n R$.



Se il numero di bit è elevato la costruzione di molte resistenze precise di valori così diversi rappresenta un problema e si preferisce usare un circuito che usa solo resistenze di valore R e $2R$.



Il circuito base è arricchito da altri circuiti pilotati dal clock di riferimento in modo che la tensione in uscita sia mantenuta per formare impulsi rettangolari di lunghezza fissa. Questa tecnica è detta **Sample & Hold (S&H)**. Per esempio se la durata degli impulsi è pari alla frequenza di campionamento, il segnale in uscita (in verde) ha l'aspetto seguente.



Naturalmente questo tipo di conversione è soggetta ad errori di vario tipo.

- **Errore di linearità**

Il circuito che abbiamo visto è composto da molte componenti che agiscono indipendentemente tra loro. Perché la conversione sia corretta è necessario che **tutti** i circuiti che alimentano le resistenze (i triangoli nelle figure) escano **esattamente** con la stessa tensione e che **tutte** le resistenze abbiano **esattamente** il valore corretto. Questo, naturalmente non è possibile e ogni imprecisione causa un comportamento non lineare nel convertitore che a sua volta produce nell'uscita distorsioni correlate con il segnale (e quindi potenzialmente

fastidiose). Si noti che anche per i convertitori DA se gli errori sono **sistematici** possono essere ridotti attraverso un processo di **calibrazione** che può avvenire al momento della costruzione o dinamicamente al momento della accensione del dispositivo.

- **Errore di passaggio per lo zero**

Nel tipo di circuito che abbiamo visto il segnale digitale di ingresso codifica una variazione tra il livello 0 e un livello $2^n A$, un segnale musicale, essendo costituito da somme di sinusoidi oscilla continuamente tra valori positivi e negativi. In questa rappresentazione lo zero del segnale musicale corrisponde al valore $A/2$ e ogni passaggio per lo zero causa una transizione tra le parole binarie

1000 0000 ... 0000 e 0111 1111 ... 1111

il convertitore a resistenze decodifica queste due configurazioni per vie completamente diverse (in quanto tutti i bit sono diversi) e ogni errore di non linearità causa una ripetuta distorsione particolarmente fastidiosa. L'**errore di passaggio per lo zero** è il principale ostacolo alla realizzazione di convertitori **DA multibit** di qualità con un numero elevato di bit (maggiore di 16).

- **Rumore analogico.**

Il segnale analogico in uscita è affetto dal suo rumore inevitabile (almeno quello termico è sempre presente) per quanto siano perfezionati i circuiti digitali questo fattore limita inesorabilmente la risoluzione in uscita .

- **Irregolarità temporali (Jitter)**

Anche il convertitore DA necessita di un riferimento temporale stabile e preciso. Come già detto il problema del **Jitter** sarà trattato diffusamente in una lezione a parte.

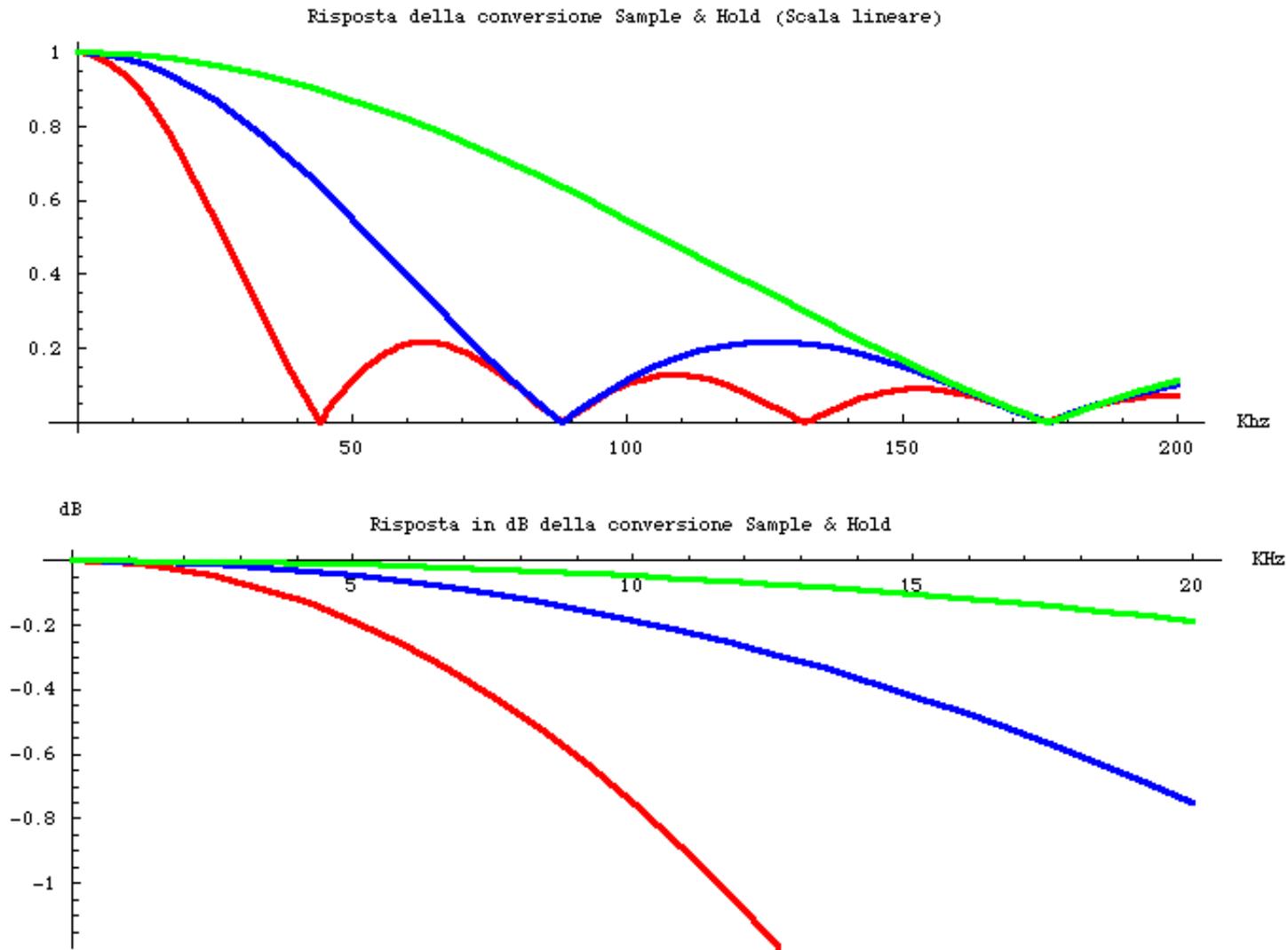
- **Errore di apertura**

Dal punto di vista matematico l'operazione, di Sample & Hold è una operazione di interpolazione che ha una sua ben precisa risposta in frequenza (un sinc), ciò causa un errore detto **errore di apertura**.

Nelle figure seguenti sono presentate, in scala lineare e logaritmica, le risposta della conversione **S&H** per un segnale campionato a **44100 Hz** 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 lunghezza reale dell'impulso per cui la curva blu è anche la risposta di un **S&H** con frequenza **88200 Hz** e durata del **100%** e la curva verde è anche la risposta di un **S&H** con frequenza **88200 Hz** e durata del **50%** oppure frequenza **176400 Hz** e durata del **100%**.

Si noti come la curva rossa presenti una attenuazione di qualche dB in banda audio che certamente non è accettabile per una riproduzione di qualità.

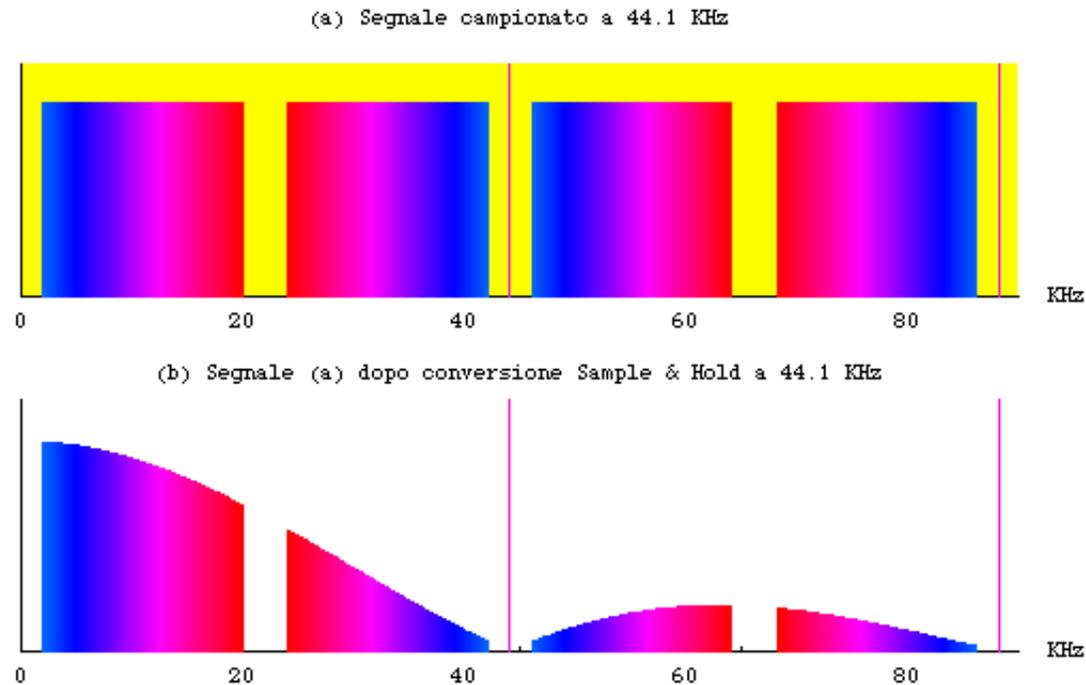
L'errore di apertura può essere fortemente ridotto qualora si usino tecniche di oversampling e, in questo caso, può anche essere annullato agendo opportunamente sul filtro digitale



Circuiti di uscita

Il segnale in uscita dal Sample & Hold ha un contenuto inaccettabile di altre frequenze che oltre a corrompere pesantemente il suono possono essere micidiali per le apparecchiature che

seguono. Nella figura seguente è riportato lo spettro del segnale digitale e del segnale analogico dopo una conversione Sample & Hold.



Se si adotta questa tecnica è necessario inserire nella sezione di post-elaborazione, prima degli stadi di uscita, un deciso filtraggio analogico anti-immagine che con le sue inevitabili distorsioni di fase è forse responsabile della quella fama di suono freddo e innaturale che caratterizzava i primi lettori di Compact Disc (specialmente di scuola giapponese).

Alcuni sedicenti **puristi** usano tutt'oggi questa tecnica (con la scusa di ridurre al minimo le manipolazioni nel digitale). I casi sono due:

- non c'è sufficiente filtraggio analogico e allora si esce con pericolose componenti ultrasoniche;
- il filtro analogico influenza il risultato sonico finale.

Probabilmente, nel secondo caso, se il filtro è fatto bene le **colorazioni** introdotte possono essere piacevoli e giustificare “moralmente” scelte di questo tipo.

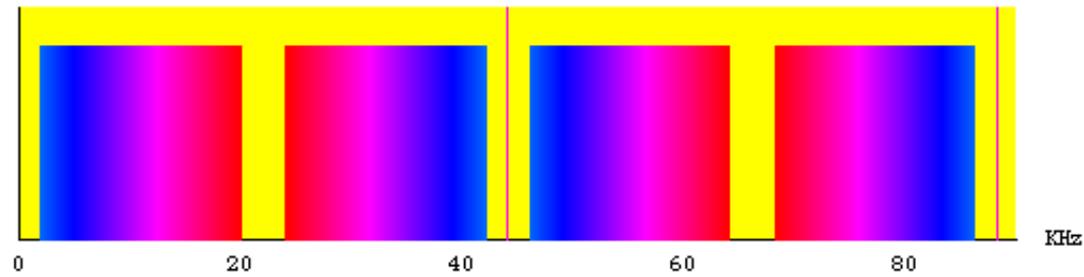
Oversampling

Una tecnica molto usata, introdotta per la prima volta dalla Philips (con il modello **CD 104**) è quella della conversione mediante **oversampling**.

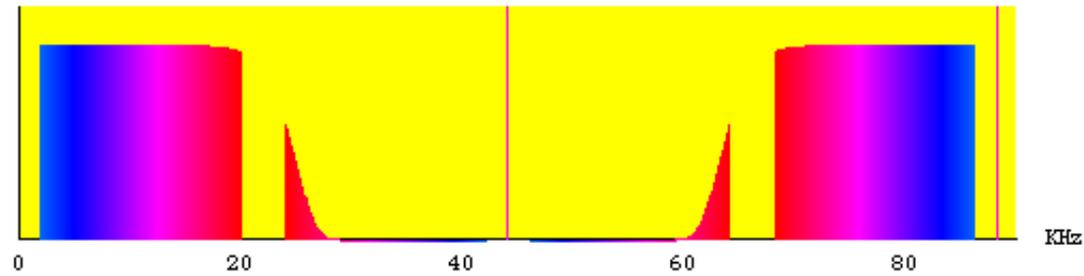
L'idea che sta alla base di questo procedimento è quella di spostare le operazioni di filtraggio nel campo digitale dove, usando un **FIR**, non si introducono alterazioni di fase.

La prima parte del procedimento consiste nell'inserire un certo numero di zeri tra un campione e l'altro. Per esempio se in un segnale campionato a **44100 Hz** 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 **88100 Hz** produce il segnale in (**e**) che può essere trattato in modo molto più agevole con un blando filtraggio passa banda.

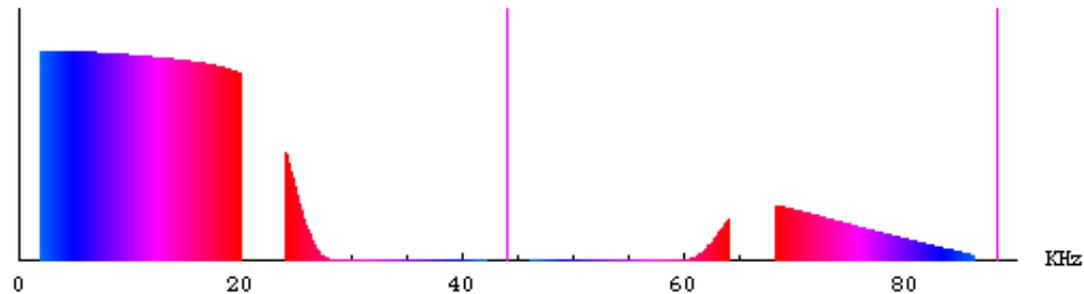
(c) Segnale (a) dopo inserzione zeri



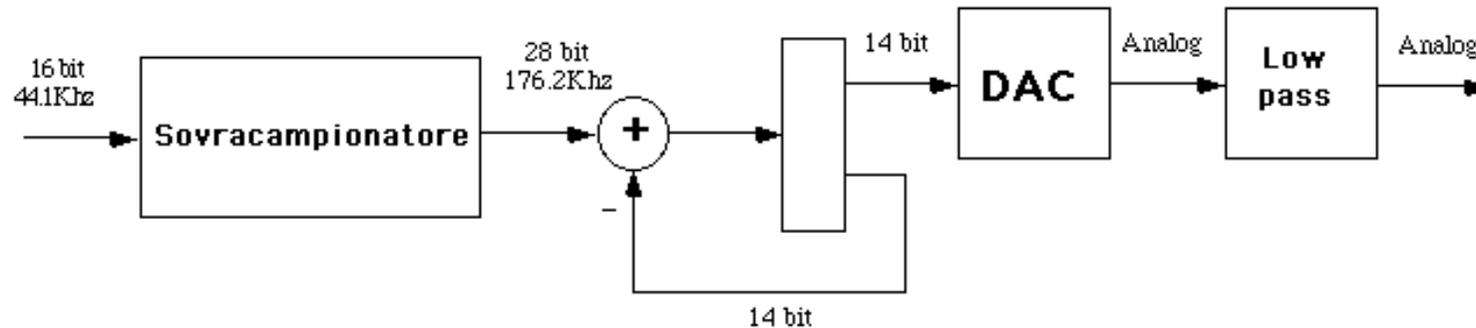
(d) Segnale (c) dopo filtraggio digitale



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



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 (18 bit, 20 bit, 24 bit).



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

Conversione con cambiamento di frequenza

È una tecnica che va molto di moda sia perché permette una pubblicistica molto appariscente sia perché, d'altro canto, riduce decisamente i costi di progettazione e costruzione.

Si tratta di estendere la parola a 24 o 32 bit e, qualunque sia la frequenza di ingresso, effettuare una conversione di frequenza di campionamento raggiungendo **96 KHz** o addirittura **192 KHz**. Le tecniche di conversione di frequenza verranno descritte in una lezione a parte qui basti sapere che

- Elevare la frequenza o estendere la parola non può aggiungere nulla in termini di informazione al segnale di partenza.
- L'operazione di conversione è delicata dal punto di vista degli errori numerici se non effettuata con la dovuta cura e con le adeguate risorse computazionali può generare un degrado del segnale.

Il vantaggio di questo metodo è che tutta la circuitazione può essere decisamente semplificata in quanto lavora ad una frequenza prefissata (96 KHz o 192 KHz).

Dal punto di vista pubblicitario si può dire che “il convertitore lavora con segnali ad alta risoluzione qualunque sia la risoluzione della sorgente”.

Dato il progredire della tecnica costruttiva le risorse necessarie ad una conversione senza errori (per esempio lavorare almeno con 32 bit) cominciano ad essere disponibili e questo approccio, pur se discutibile in teoria, si avvia a divenire uno standard.

Conversione Sigma-Delta

Questa tecnica risolve alla radice alcuni problemi della conversione DA multibit (distorsione di passaggio per lo zero) e si presta bene ad essere integrata a basso costo. È stata dapprima introdotta e utilizzata nelle realizzazioni economiche ma con l'avvento dei formati ad alta risoluzione (24 bit ed alte frequenze di campionamento) si è rivelata come l'unica strada percorribile per raggiungere prestazioni allo stato dell'arte.

- **Conversione Sigma-Delta monobit.**

1. sovracampionamento elevatissimo e riduzione a 1 bit con noise-shaping multistadio e filtraggio passa basso digitale
2. conversione ad 1 bit (in pratica basta un integratore)
3. passa basso a bassa pendenza

Questa conversione assume nomi diversi (**MASH**, **Pulseflow**, ecc) a seconda del costruttore che la realizza. Ricordiamo ancora che nello standard DSD usato per il SuperAudio CD il segnale digitale di ingresso è già in forma di un flusso ad 1 bit.

Recentemente si è trovato un compromesso tra la conversione multibit classica e quella Sigma-Delta monobit che consiste nel usare per gli stadi sigma delta un numero di bit ridotto ma comunque superiore ad 1.

- **Conversione Sigma-Delta multibit.**

1. sovracampionamento moderato (8x) con riduzione del numero di bit con noise-shaping multistadio e filtraggio passa basso digitale
2. uso di un convertitore con pochi bit e quindi veloce e preciso
3. passa basso a bassa pendenza

Trattamento nel dominio del tempo

Questa tecnica venne presentata in passato per in implementazioni di grande prestigio (e costo) spacciandola per una grande innovazione rispetto al sovracampionamento per inserzione di zeri. Essa consiste dei seguenti passi

1. sovracampionamento con interpolazione numerica nel dominio del tempo (e.g. spline cubiche)
2. convertitore DA multibit
3. passa basso a bassa pendenza

La realizzazione del passo 1 richiedeva l'uso di **processori digitali (DSP)** dedicati e questo giustificava il costo molto elevato.

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 (almeno a detta degli esperti) 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 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 rispetto ad alternative economiche come la conversione Sigma-Delta.

Riduzione del rumore mediante parallelizzazione

Immaginiamo di avere due convertitori DA identici alimentati con lo stesso segnale digitale e con le uscite in parallelo. Siano $s(t) + r_1(t)$ e $s(t) + r_2(t)$ i segnali uscenti dai due convertitori, dove $s(t)$ è il segnale analogico corretto e $r_1(t)$ e $r_2(t)$ sono gli errori.

Il segnale analogico risultante è proporzionale alla somma dei segnali uscenti dai due convertitori e si può dimostrare che sotto l'ipotesi gli errori siano segnali aleatori con distribuzione gaussiana di media zero e uguale varianza, il rapporto segnale-rumore migliora di circa **1.5 dB**.

La cosa si può estendere e, per esempio parallelizzando 8 convertitori si guadagnano circa **6 dB** (equivalenti ad un bit di risoluzione). Ovviamente questa tecnica nulla può contro gli errori non casuali o contro il rumore già presente nel segnale digitale di partenza.

Modelli commerciali di convertitore DA

Vediamo ora le specifiche e la struttura interna di alcuni convertitori Digitale-Analogico recenti e del passato.

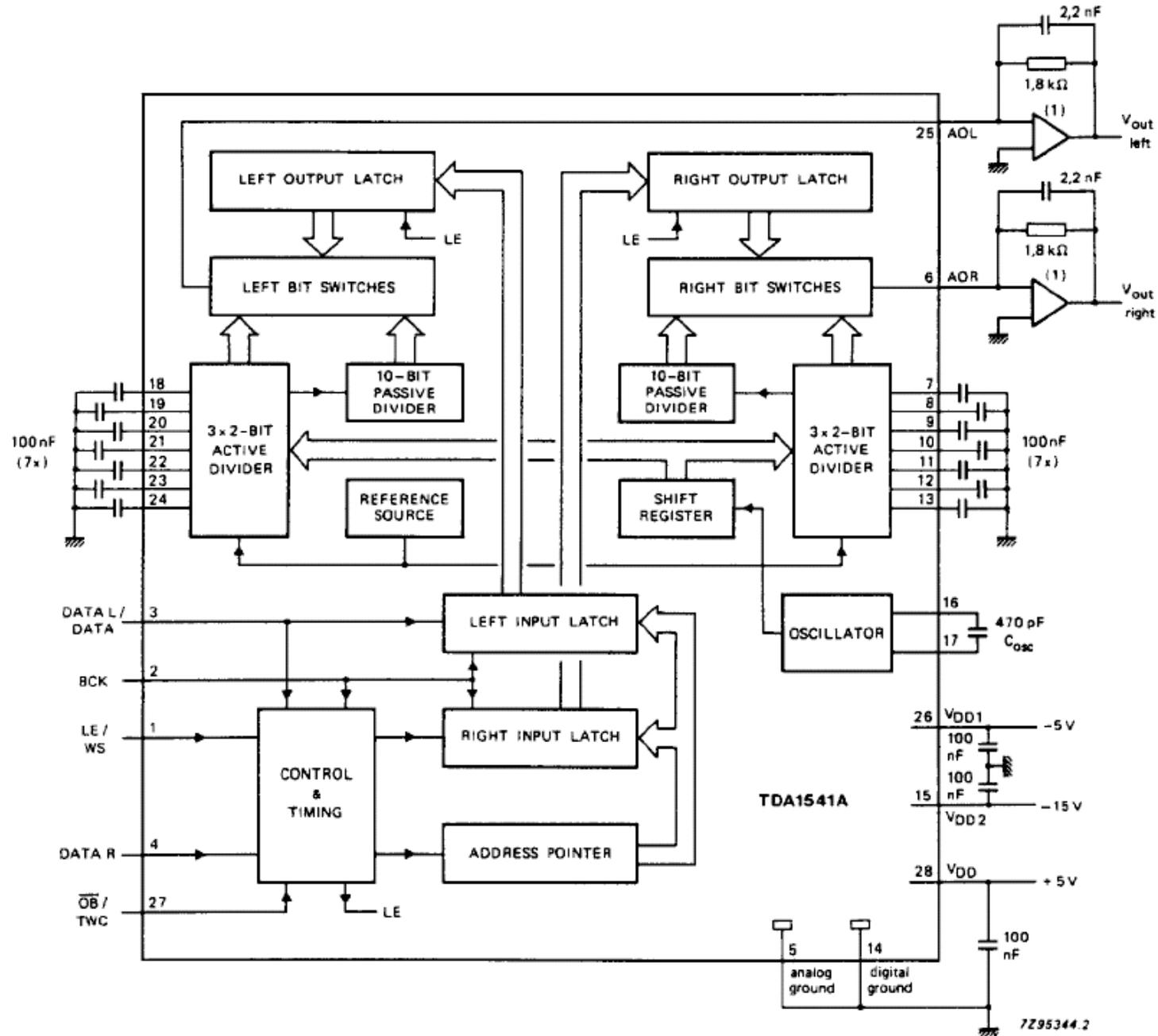
Philips TDA 1541A

Iniziamo con un classico, si tratta di un convertitore del 1991, multibit puro a 16 bit, Nel chip vi sono due unità di conversione per cui in una apparecchiatura stereo ne bastava uno. I circuiti per l'oversampling e il filtraggio erano esterni al convertitore e il convertitore accettava frequenze fino a **48 KHz x 8 = 384 KHz**. In alcune realizzazioni di pregio venivano usati più di un convertitore per canale, mettendo le uscite in parallelo per ridurre l'errore.

- **Specifiche**

Frequenza di campionamento	fino a 384 Khz
Bit in ingresso	16
Gamma Dinamica	102 dB
THD+N a 0 dB	95 dB

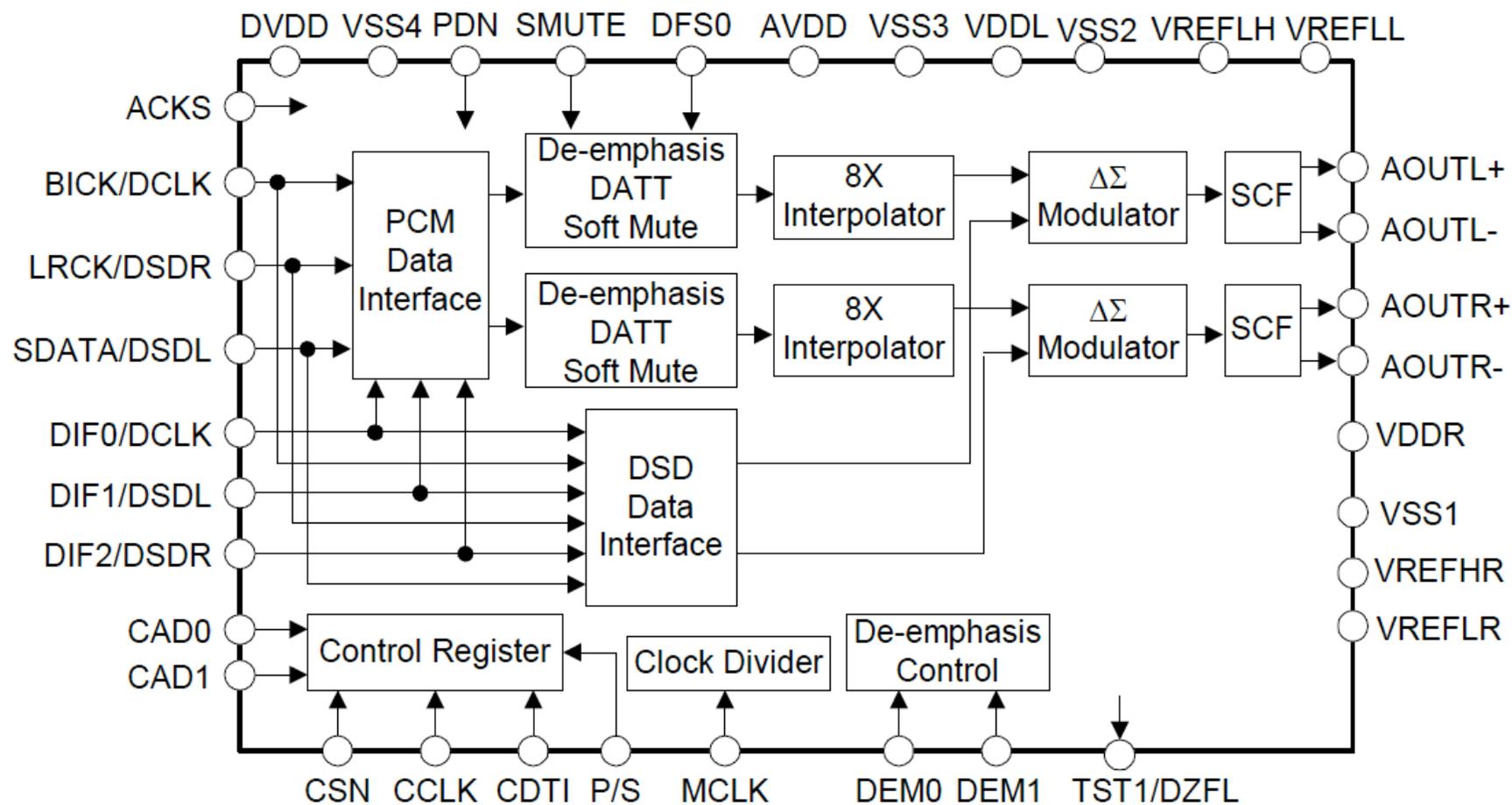
- Diagramma funzionale



Asahi Kasei Microdevices AK4397

Si tratta di un convertitore Sigma-Delta Multibit dell'ultima generazione capace di accettare sia segnali multibit fino a **24 bit/192 KHz** sia segnali ad 1 bit (formato **DSD**) in modo da poter venire usato nei lettori SACD. Il chip è stereo e **tutto-compreso**, è presente anche un regolatore di volume digitale a 256 passi.

- **Diagramma funzionale**



- **Specifiche**

Frequenza di campionamento	fino a 192 KHz
Bit in ingresso	fino a 32
Gamma Dinamica (192 KHz)	104 dB
THD+N a 0 dB (192 KHz)	100 dB

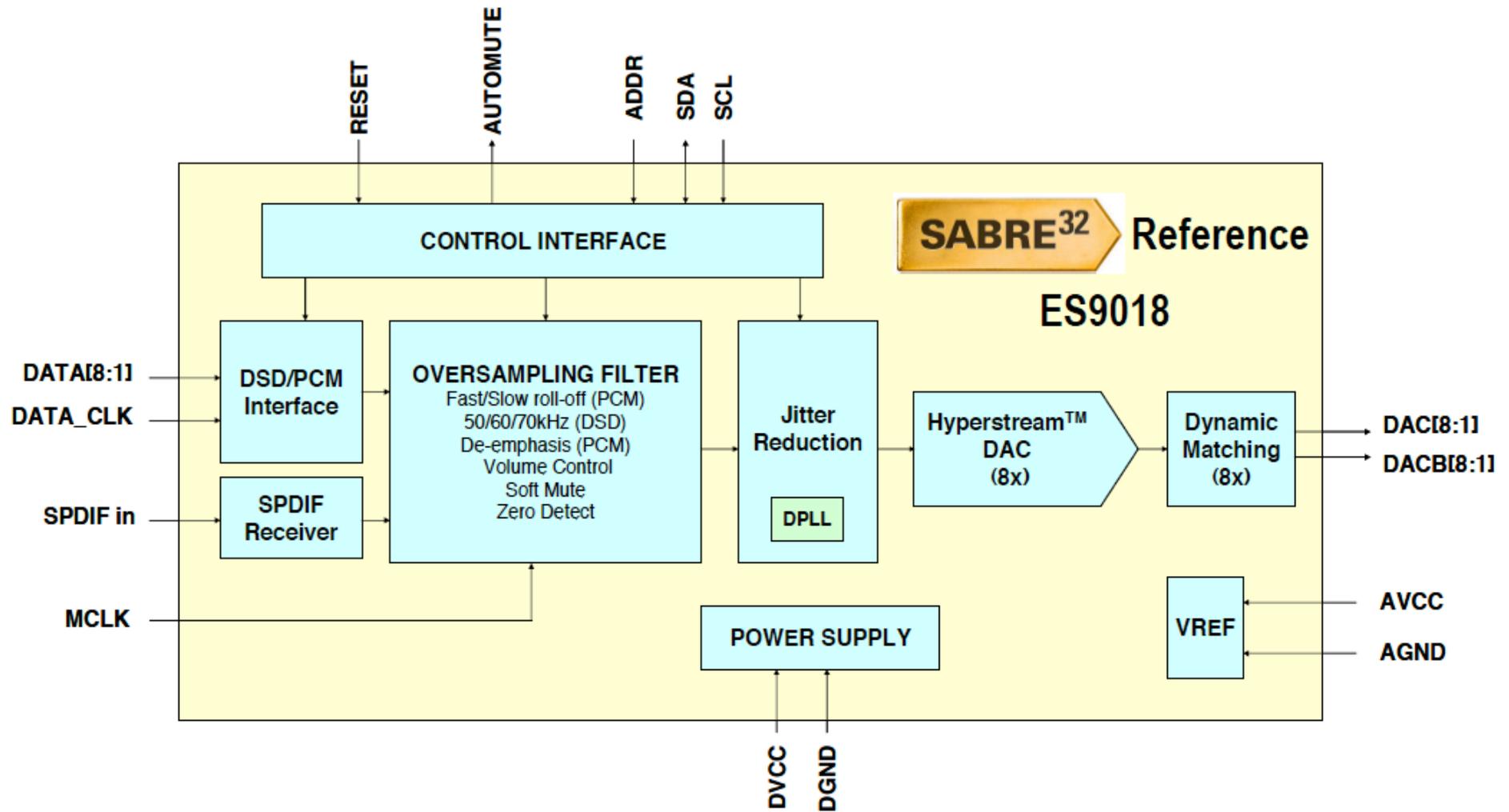
Sabre ES 9018

Anche questo è un convertitore Sigma-Delta Multibit con oversampling 8x a 192 KHz. La struttura interna è a 32 bit e sono presenti tutti i circuiti ausiliari necessari (addirittura è presente un ingresso SP/DIF per un collegamento diretto con un apparecchiatura esterna), anche i segnali DSD sono accettati. Questo modello contiene 8 canali audio in modo da potere essere usato in apparecchiature Home-Theater a molti canali oppure in stereo parallelizzando le uscite a gruppi di 4 (o a gruppi di 8 utilizzandone 2). Si noti che il filtro digitale interno può essere programmato dall'utilizzatore

- **Specifiche**

Frequenza di campionamento	fino a 192 KHz
Bit in ingresso	fino a 32
Gamma Dinamica (192 KHz) un canale, pesato A	129 dB
Gamma Dinamica (192 KHz) con 8 canali in parallelo, pesato A	135 dB
THD+N a 0 dB (192 KHz)	120 dB

- **Diagramma funzionale**

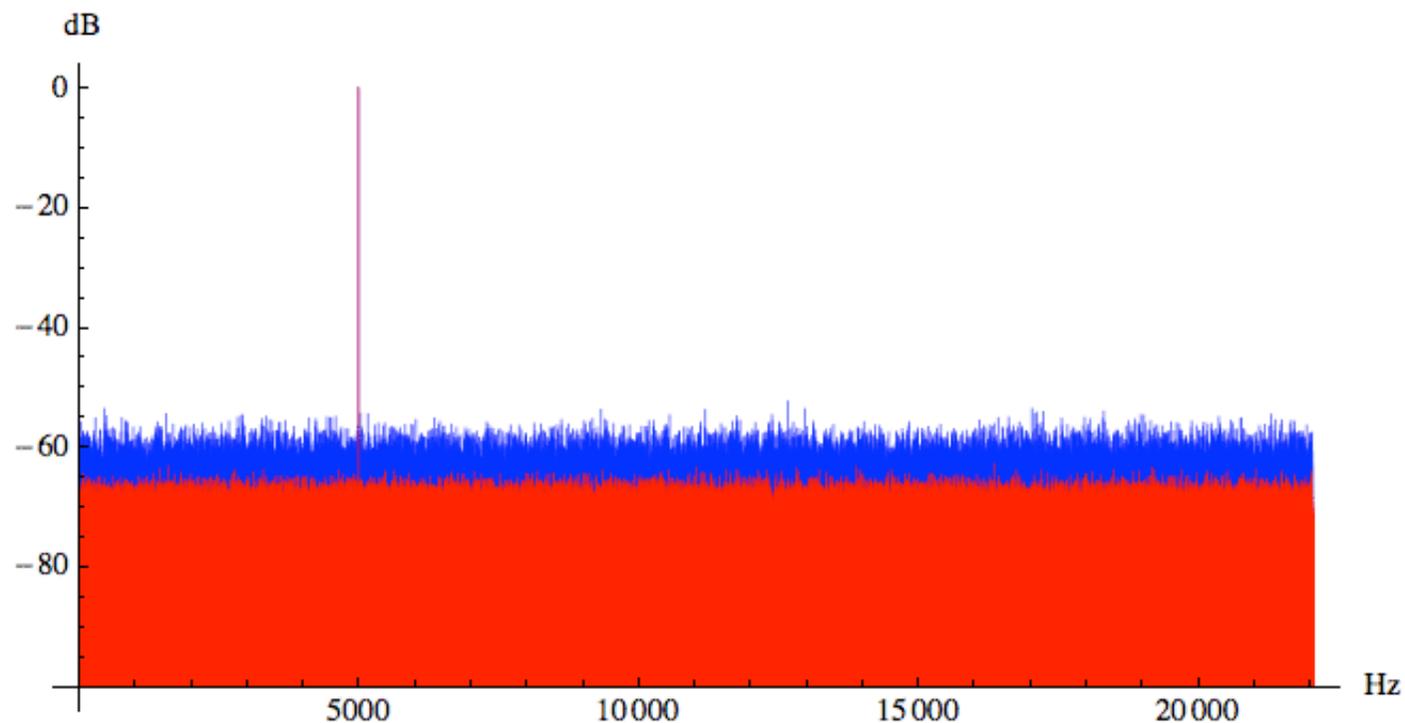


Digressione sulle misure

Non si può sottolineare mai abbastanza l'importanza delle misure nella progettazione, collaudo e valutazione delle apparecchiature elettroniche. Solo con una chiara conoscenza delle specifiche e con la certezza che tali specifiche siano rispettate si possono collegare tra loro apparecchi diversi senza correre il rischio di rotture o di incidenti. E se a casa di un audiofilo il rischio è spesso solo quello di ascoltare male, in campo professionale i danni economici o alle persone possono essere notevoli.

D'altra parte è però altrettanto indispensabile saper leggere le misure stesse onde evitare di trarne conclusioni fuorvianti nell'uno o nell'altro senso.

Nell'esempio che segue si è generato un segnale sinusoidale puro a **10000 Hz** con un rumore casuale posto esattamente a **-20 dB**, il campionamento è a **44100 Hz** e quindi il rumore è spalmato tra **0 e 22050 Hz**. Che l'andamento del rumore sia lineare su tutta la gamma di frequenze si può facilmente verificare attraverso l'analisi di Fourier. La figura mostra, sovrapposte, un'analisi su **1 secondo** (in blu) e un'analisi su **10 secondi** (in rosso).



Il fatto che il tappeto di rumore in rosso sia mediamente **10 dB** sotto quello in blu è la naturale conseguenza che in entrambe le analisi il segnale buono rimane in una sola componente mentre il rumore si divide in tutte le componenti e ovviamente essendo il numero delle componenti di un fattore 10 il livello medio del rumore sembra inferiore di 10 dB.

Morale della favola: l'analisi spettrale è un'ottima cosa per studiare la natura del rumore e individuare la presenza di spurie o di componenti correlate col segnale (per esempio la distorsione armonica) ma evincere ad occhio il livello di rapporto **Segnale-Rumore** guardando il livello del tappeto di rumore nel grafico di analisi è un **errore banale** che può dare origine a **facili e immotivati entusiasmi**.

Conclusioni

Per finire ecco alcune considerazioni finali.

- Anche per i convertitori DA la risoluzione totale è in ogni caso inferiore ai 20 bit e in ogni caso non esiste materiale audio naturale a risoluzione maggiore. (fanno eccezione i segnali sintetici generati direttamente con il computer che, finché restano digitali, possono avere qualsiasi risoluzione), per la dinamica vale quanto detto alla fine della lezione precedente.
- Il semplice chip di conversione (dal costo di pochi euro) va inserito in un lettore o in un apparecchiatura di conversione stand-alone che oltre alla scatola e connettori fornisce le alimentazione e gli stadi finali.
- Probabilmente il suono di un convertitore è dato in gran parte dal filtro (o dalla sua assenza). Naturalmente differenze grandi nel suono si sentono bene anche su impianti economici ma per le sfumature è necessario che tutto il resto dell'impianto sia di alto livello (alimentazioni e sezioni analogiche comprese).