

6. IL CAMPIONATORE

Per analogia possiamo paragonare un campionatore ad una cinepresa, la cinepresa cattura le immagini e le fissa su pellicola, fotogramma dopo fotogramma, attimo dopo attimo, il campionatore fa la stessa cosa con il suono, registrando il suo andamento nel tempo.

Il campionatore è uno strumento per molti aspetti simile ai sintetizzatori per forme d'onda. Come questi infatti utilizza forme d'onda o suoni *campionati* e permette di riprodurli intonati su tastiera. La differenza sostanziale sta però nel fatto che mentre i sintetizzatori per forme d'onda hanno a disposizione una **wavetable** di suoni utilizzabili, caratteristica dello strumento e non modificabile (le modifiche si effettuano EG, filtri ecc.) il campionatore non ha campionamenti preregistrati ma ha la possibilità di registrare i propri suoni direttamente, sia che la sorgente sonora sia ripresa microfonicamente che da ingresso di linea. Il campionatore ha potenzialità vastissime, proprio perché non è vincolato da una tavola sonora fissa e quindi aggiornabile nel tempo. Può essere utilizzato in una infinità di situazioni, spesso in studio per riprodurre suoni realistici (esiste in commercio una libreria fornitissima di suoni), per creare sonorità inedite, dal vivo per suonare tracce aggiuntive (per esempio cori registrati in studio), in sonorizzazioni per programmi radiofonici o televisivi, in performance di DJ ecc.

Il significato di campionare è quello di catturare i suoni esterni e memorizzarli digitalmente nella memoria interna del campionatore. Praticamente, equivale a registrare un segnale utilizzando un trasduttore che lo converta dal formato originale (analogico) a quello più adatto (digitale) alla memorizzazione, ed attraverso un sistema che controlli la registrazione e la riproduzione, memorizzarlo su di un supporto adatto, cioè renderlo utilizzabile ogni volta che lo si desideri. Il paragone con un registratore a cassette viene da sé. Infatti esso è un apparecchio conosciuto ed utilizzato da tutti, si immagini quindi di registrare un segnale sonoro prima con un normale registratore a cassetta, poi tramite un campionatore, cioè un registratore digitale.

Il segnale sonoro viene raccolto dal microfono che lo trasduce in segnale elettrico che viene inviato alla testina del registratore. Questa crea dei campi elettromagnetici in modo proporzionale al segnale ricevuto e polarizza le particelle magnetiche alla superficie del nastro. Il segnale memorizzato viene successivamente riprodotto da una testina di lettura, che scorrendo il nastro ne rileva le differenze di magnetizzazione, le riconverte in segnali elettrici e le invia ad un altoparlante (un trasduttore che lavora in modo inverso al microfono), da cui si riottiene il segnale sonoro originale. La caratteristica fondamentale del segnale considerato è quella di essere analogico, cioè continuo nel tempo; ad ogni istante che trascorre può assumere un qualsiasi valore tra un minimo ed un massimo. Quando si esalta la fedeltà di un impianto non si fa che decantare la minima differenza

che esiste tra un segnale in ingresso ed uno in uscita, più questa è piccola e più il segnale riprodotto è simile a quello originale.

Ci sono delle difficoltà da superare per ottenere questo risultato; il microfono e in generale tutti i componenti di un sistema analogico, sono sorgenti di rumore che intaccano la fedeltà della riproduzione del segnale, il quale subisce un ulteriore deterioramento ad ogni lettura perché ogni passaggio del nastro sulla testina di lettura, provoca un'abrasione irrecuperabile. Inoltre, il trascorrere del tempo può portare ad una smagnetizzazione del nastro contenente la registrazione, effetto che rende poi impossibile ricostruire il segnale originale. Questo provoca un aumento del rumore e di conseguenza una riduzione del rapporto S/N (segnale/disturbo), e della dinamica (intesa come differenza tra il massimo livello di segnale possibile stabilito dalla fisica dei componenti dei circuiti, ed il livello del rumore).

Altro fattore determinante della fedeltà di un segnale, è la limitazione della banda di frequenza che è in grado di riprodurre; ad esempio le frequenze basse rappresentano un problema per microfoni ed altoparlanti, mentre quelle alte lo sono per i circuiti analogici che stabiliscono un limite alla frequenza più alta che li può attraversare. Una parziale soluzione a questi problemi può essere ottenuta mediante la trasformazione numerica, cioè digitale, delle forme d'onda che compongono un segnale sonoro. Questo non aumenta i limiti imposti dalla larghezza di banda ridotta e determinata dall'attuale tecnologia dei trasduttori, ma consente, entro certi limiti, la ricostruzione di un segnale numerico pulito da uno deteriorato, annullandone per così dire l'invecchiamento e soprattutto consente di utilizzarlo infinite volte senza per questo accrescerne il livello del rumore. **Ma la garanzia maggiore che dà un segnale digitale, è quella di poterne fare tutte le copie che si vuole ed operare su di esso in fase di montaggio, filtraggio e modifica con precisione assoluta senza perdita alcuna di qualità.**

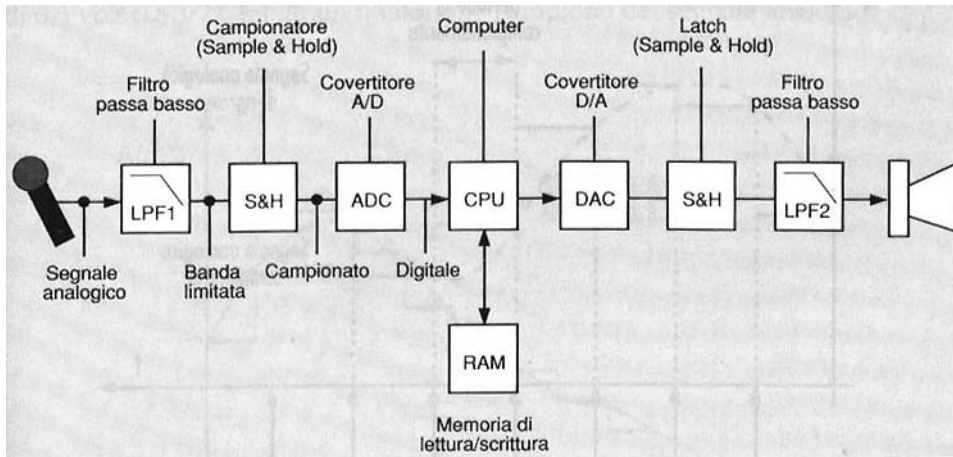
CAMPIONAMENTO

Vediamo ora cosa accade all'interno di un campionatore. Anche in questo caso l'onda sonora è ricevuta da un microfono che la trasduce in segnale elettrico che viene inviato ad un filtro passabasso (**LPF1**); successivamente viene campionato da un circuito **S&H** (Sample & Hold) ed inviato al convertitore analogico/ digitale (**ADC**) che lo trasforma in valori numerici, cioè lo digitalizza; un microprocessore (**CPU**) si incarica poi di immagazzinarlo in memoria (**RAM**). Durante la riproduzione, il microprocessore legge i dati residenti in memoria e li invia ad un convertitore digitale/analogico (**DAC**) e successivamente ad un circuito latch (Sample & Hold); infine raggiungono un filtro passabasso (**LPF2**) e di seguito un altoparlante. Un segnale digitale è sempre discreto e non continuo, cioè non può assumere tutta la gamma di valori tra un minimo ed

un massimo, ma valori che invece individuano sempre due gradini, cioè saltano senza continuità tra due punti dello spazio che di volta in volta viene considerato.

L'attività svolta in questo sistema è scandita da una specie di orologio interno (**clock**), che determina in quali istanti il sistema cambia stato, cioè in cui accade un evento che non può quindi essere in un momento qualsiasi come nei comuni sistemi analogici, ma solo in quelli dettati dal clock.

Quindi il segnale trasformato in numerico non può assumere con continuità tutti i valori possibili



ma solo quelli che il sistema è in grado di codificare. Di seguito si esaminerà nuovamente, ma in modo più dettagliato, il

percorso fatto dal segnale; all'interno di un sistema digitale.

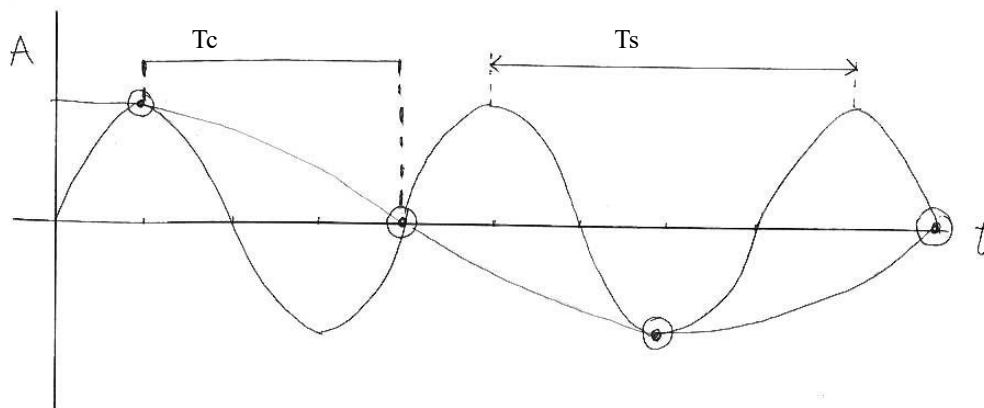
FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO

Il segnale analogico proveniente dal microfono raggiunge il filtro passabasso (LPF) che serve ad eliminare dal segnale stesso tutte le frequenze troppo acute per il sistema di cui si dispone. **Il teorema di Shannon (o Nyquist)** garantisce che nell'operazione di campionamento non si ha perdita di informazioni *se la frequenza di campionamento F_c è almeno il doppio della frequenza più alta presente nel segnale da campionare.*

Si può anche dire che la frequenza di campionamento deve essere un'ottava più acuta rispetto alla frequenza più elevata che si deve campionare, frequenza che non è riferita alla fondamentale (nota che si suona) ma alla frequenza più acuta presente nello spettro armonico. A questo punto il circuito Sample & Hold nella maggior parte dei casi incluso nell'ADC, effettua il campionamento. In pratica il clock di sistema fa in modo che ogni $1/F_c$ secondi questo circuito scatti tante fotografie, prese ad intervalli rigorosamente regolari, detti periodi di campionamento ($T_c=1/F_c$). Naturalmente più spesso si registrano i campioni, o meglio maggiore è la frequenza di campionamento F_c , è più sarà fedele la successiva riproduzione del segnale (teorema di Shannon).

ALIASING. Se al circuito S&H non si anteponesse il filtro passabasso LPF si potrebbe incorrere nel fenomeno dell'aliasing o foldover, cioè dell'introduzione nel campionamento di parziali non armoniche, che generano rumore ed effetti dissonanti tipo ring modulator. Ad esempio, si supponga

di dovere campionare un piatto splash e di avere scelto come frequenza di campionamento $F_c=50$ kHz. Con questi presupposti teoricamente potremo campionare tutte le armoniche entro i 25 kHz, ma sicuramente, anche se il nostro udito non è in grado di percepirle (il campo dell'udibile va infatti da 16 Hz a 20 kHz) il piatto splash emetterà anche armoniche con frequenza superiore chiamate F_s . In questo caso viene a crearsi una frequenza immagine (alias) $F_a=F_s-F_c/2$. Questa frequenza F_a viene registrata in memoria come rumore che disturba la registrazione digitale. Al fine di eliminare questo fastidioso fenomeno viene introdotto un filtro passabasso LPF1 la cui funzione è quella di impedire a tutte le armoniche superiori a $F_c/2$, ossia ai 25 kHz, di raggiungere il convertitore ADC. È difficile ottenere filtri che attenuino esattamente solo le frequenze indesiderate; in generale più la pendenza del filtro si avvicina a 90 gradi e più aumentano le possibilità di eliminare le armoniche indesiderate.

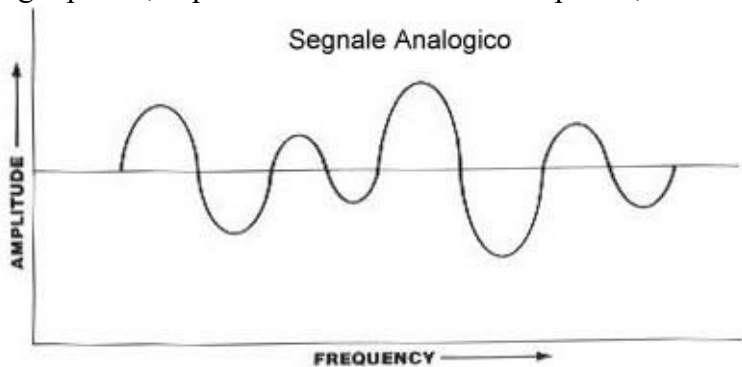


Facciamo ora un esempio. Supponiamo che la nostra frequenza di campionamento sia $F_c=20.000$ Hz ($T_c=50$ microsecondi), mentre la frequenza dell'armonica più alta sia $F_s=15.000$ Hz ($T_s=66$ microsecondi circa). Come possiamo vedere graficamente dalla figura non si riesce a campionare l'onda reale ma una fittizia. La frequenza fantasma (Alias) che si viene a formare ha periodo triplo di T_s (l'onda alias comprende tre cicli dell'onda della armonica alta), quindi la frequenza avrà valore di un terzo : $F_a = 1/3 \times 15.000 \text{ Hz} = 5.000 \text{ Hz}$. Si giunge allo stesso risultato applicando la formula $F_a=F_s-F_c/2$:

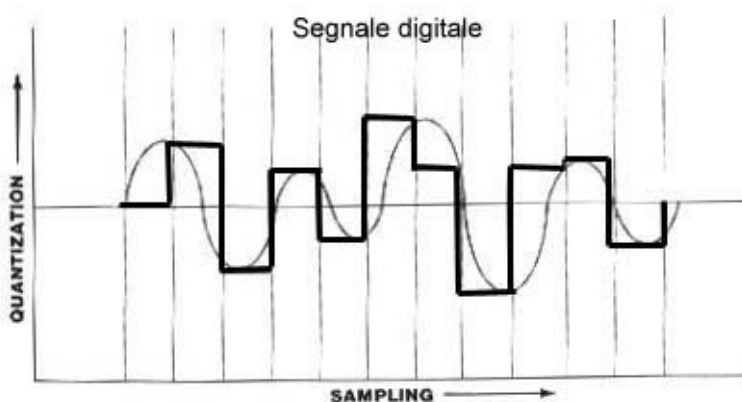
$$F_a = 15.000 - 20.000/2 = 5.000 \text{ Hz.}$$

QUANTIZZAZIONE

Il campionamento produce una discretizzazione sulla asse delle ascisse (tempo) per cui risulta che non tutti gli istanti sono significativi, ma effettivamente contano solo quelli in cui il sistema campiona. Il tempo di hold mantiene il segnale a livello costante mentre il convertitore ADC trasforma il segnale campionato da analogico a digitale. Per fare questo esegue delle **operazioni di quantizzazione** convertendo un segnale elettrico in ingresso, quasi sempre una tensione, e restituendo in uscita una parola binaria formata da **N bit**. In pratica con N bit a disposizione per ogni parola, si possono definire 2^N diverse parole, che costituiscono i quanti o livelli di



quantizzazione possibili. Ad esempio una parola di 8 bit ($N=8$), darà origine a 2^8 livelli, cioè 256.



La quantizzazione dà origine ad una rappresentazione a scalini della forma d'onda campionata; la differenza tra un gradino e quello immediatamente successivo è detto LSB (Least Significant Bit, o bit meno significativo). Per cui ne risulta che, maggiore è il numero dei livelli di quantizzazione, migliore è l'approssimazione tra il segnale a gradini ed il corrispondente segnale analogico continuo. Da questo ne deriva che le parole in uscita dall'ADC differiscono tra loro di almeno un LSB e quindi non possono assumere tutti i possibili valori come nel caso dei segnali analogici; è pertanto necessario effettuare una sorta di approssimazione tra due livelli di quantizzazione adiacenti.

Questa approssimazione comporta un errore di quantizzazione che è man mano riducibile all'aumentare del numero di bit N a disposizione per parola. In generale se **W** è il campo, tra un minimo ed un massimo, nel quale varia l'ampiezza del segnale campionato, il gradino LSB vale W/N , cioè cala al crescere di N, mentre l'errore massimo di quantizzazione vale **LSB/2**.

Gli errori di quantizzazione producono delle evidenti difficoltà nella ricostruzione del segnale che risulterà tanto meno fedele quanto più questi saranno elevati. Da questo ne deriva che, più N è alto, cioè più livelli di quantizzazione si hanno per definire uno stesso segnale, e più risulta fedele la rappresentazione del segnale (Figura 4.51).

La dinamica è intesa come il rapporto tra i volumi più forte e più piano; una volta fissato il livello massimo di volume questo rapporto cresce in funzione del minimo segnale percepibile, cioè del rumore. Diminuendo il rumore si abbassa la soglia rendendo udibili anche i minimi volumi di un suono. La dinamica viene spesso indicata anche come rapporto Segnale/Rumore (S/N).

La dinamica del segnale campionato dipende dal numero di bit utilizzati nella conversione: la dinamica massima ottenibile con un ADC viene espressa in dB e viene calcolata tramite la formula: $(6 \times N) + 1.8$, con N che rappresenta i bit usati per parola. Con 8 bit è possibile ottenere una dinamica di $(6 \times 8) + 1.8 = 49.8\text{dB}$, appena accettabili per esigenze musicali non a livello professionale. Una riproduzione sonora decente deve avere almeno 60dB di dinamica, questo tenendo in considerazione che chitarre e bassi elettrici, pianoforti e percussioni possono produrre picchi dinamici di 100dB.

Il rumore e la dinamica sono strettamente correlati, infatti il minimo livello di volume percepibile è imposto dal rumore che funziona perciò come una soglia per i passaggi pianissimo.

Applicando la formula sopra descritta, un convertitore ADC a 16 bit è in grado di fornire una dinamica di $(6 \times 16) + 1.8 = 97.8\text{dB}$.

REGISTRAZIONE (RECORDING)

Quando l'ADC ha convertito un campione, cioè ha trasformato il segnale originale in **word** (parole) binarie, avverte la CPU (microprocessore) che legge il dato e lo scrive in RAM, che è un'area di memoria che mantiene dati e programmi durante la loro elaborazione. In pratica ogni livello di ampiezza (A) dell'onda viene trasformato in un numero (word) che viene successivamente scritto in una cella di memoria RAM dalla CPU. Tra un "prelievo" (campione) e l'altro, trascorre un tempo T_c o periodo di campionamento. Per eseguire questa operazione la CPU ha a disposizione un tempo minore di T_c : considerando una F_c di 32 kHz, che poi è il minimo nel campo dell'Hi-Fi, ed applicando la formula $T_c = 1/F_c$, risulta che la CPU deve scrivere o leggere un dato, in meno di 30microsec, cioè in meno di 30 milionesimi di secondo; fortunatamente la tecnologia odierna permette questo ed altro.

Si tenga presente che una word non rappresenta mai un numero di bit a priori, ma dipende dal convertitore ADC; se un campionatore possiede un ADC con risoluzione a 8 bit, allora il

numero di bit che compongono la word corrispondente sarà 8; se l'ADC è a 16 bit allora il numero di bit che compongono la word sarà 16 e così via.

Per convertire il numero di word in byte basta applicare la formula :

Byte = (W x N) / 8, dove W = è il numero di word, N = risoluzione. Per esempio se il nostro campionatore lavora a 16 bit e la memoria è di 16 megaWord, i byte corrispondenti saranno :
Byte = (16 M x 16)/2 = 32 Mbyte.

MEMORIA RAM

Un campionatore ha bisogno di molta memoria RAM per funzionare. Proviamo a fare un esempio. Supponiamo di voler utilizzare un suono stereofonico della durata di 4 secondi con risoluzione di 16 bit e frequenza di campionamento a 44.100 Hz. La memoria che occorrerà sarà :

44.100 (numero di campioni al secondo) x 2 (16 bit = 2 byte per ogni campionamento) x 2 (due canali stereofonici) x 4 (secondi) = 705.600 byte.

Lo stesso calcolo possiamo ripeterlo per l'Hd recording, 1 minuto di musica registrata in stereofonia corrisponderà ad un volume su disco rigido di $44100 \times 2 \times 2 \times 60 = 10.584.000$, cioè circa 10 megabyte. Chiaramente per le registrazioni multitraccia il calcolo va esteso al numero di tracce utilizzate.

Molti modelli di campionatori, offrono la possibilità di espandere la memoria RAM con l'aggiunta di circuiti speciali (SIMM), chiamati "espansioni": esse sono generalmente della capacità di 8 Mega, ma esistono anche circuiti con capacità superiori (16, 32, 64).

CONVERSIONE DIGITALE ANALOGICO

Durante la conversione digitale/analogico giocano un ruolo determinante la frequenza di campionamento F_c , che come già visto indica il numero di campioni che vengono memorizzati in un secondo, e la frequenza di lettura F_l , che indica il numero dei campioni in forma numerica che vengono letti e convertiti in tensioni analogiche dal DAC in un secondo. Per fare un esempio molto semplice, nei CD il suono viene campionato con $F_c=44.1$ KHz, e viene riprodotto con $F_l=44.1$ KHz, cioè esattamente alla stessa velocità; ne consegue che il suono riprodotto è esattamente identico a quello campionato sia come timbro che come altezza. A volte si campiona una sola nota di un determinato strumento, ma poi si vuole di riprodurla per tutta l'estensione della tastiera.

Tecnicamente ciò è possibile variando la frequenza di lettura; infatti, se ad esempio si ascolta un 45 giri a velocità 33, si sentiranno delle note di altezza inferiore a quelle originali, così come se ne sentiranno di altezza superiore se lo si fa girare a 78 giri. In conclusione, quando $F_l=F_c$, il suono è riprodotto alla stessa altezza di quello originale che è stato campionato; quando $F_l=F_c/2$ il suono è riprodotto un'ottava più in basso; quando $F_l=2 \times F_c$ il suono è riprodotto un'ottava più in alto.

A questo punto se si desidera riprodurre il suono due ottave più in basso dell'originale, bisogna utilizzare una $FI = F/4$, cioè $FI = 12,5\text{KHz}$, a cui corrisponde una TI pari a 80 millisecc; se viceversa lo si vuole riprodurre due ottave più in alto dell'originale, bisogna utilizzare una $FI = 4 \times Fc$, cioè 200KHz, a cui corrisponde una FI pari a 5 millisecc. In generale quindi, quando al campionatore perviene un messaggio di Note On, automaticamente la CPU e il DAC scelgono l'appropriata frequenza di lettura FI per ottenere la nota desiderata. Il campionatore opera quindi una trasposizione del suono lungo la tastiera (pitch-shift); in termini operativi per fare questo si possono utilizzare due metodi: lettura a frequenza variabile o a frequenza fissa.

Nel primo metodo viene effettivamente operata una variazione di FI ; si supponga di campionare un sax soprano con $Fc = 50\text{KHz}$ per 2 sec. Quando viene eseguita la nota originale campionata FI sarà uguale a Fc . Se si opera una trasposizione di un'ottava verso il basso risulta $FI = Fc/2$, cioè il tempo di lettura raddoppia e il suono dura il doppio, se trasponiamo di un'ottava verso l'alto risulta $FI = 2 \times Fc$, cioè il tempo si dimezza ed il suono dura la metà.

Le cose si complicano quando vengono suonate più note contemporaneamente, il problema esiste anche perché tutti i campionatori sono polifonici almeno a 8 voci; in pratica quando viene suonato un accordo, le singole note che lo compongono vengono lette con FI diverse ma finiranno di suonare in istanti diversi, perché un DAC può convertire i campioni con una sola frequenza. Per fare in modo che le note finiscano di suonare contemporaneamente bisognerebbe dotare il campionatore di tanti DAC quante sono le note che compongono l'accordo. Teoricamente servirebbero tanti DAC ed i relativi filtri ricostruttori LPF2 quante sono le voci di polifonia incidendo in maniera determinate sui costi di produzione. I modelli più sofisticati utilizzano questo metodo, il cui pregio principale sta nella relativa semplicità di progettazione dell'hardware e del software di gestione oltre ad una minore distorsione di trasposizione, ridotta grazie al fatto che ogni suono passa attraverso circuiti di elaborazione individuali.

I campionatori meno costosi utilizzano il secondo metodo, cioè quello della frequenza fissa, che consiste nell'utilizzare alcune particolari tecniche per variare la frequenza di lettura. In pratica il DAC converte i campioni sempre alla stessa velocità ($FI = Fc$), ma per suonare un accordo, derivato da un unico timbro campionato, bisogna inviare al DAC tre differenti versioni di quel timbro. Per fare questo vengono utilizzate delle tecniche di **interpolazione e sottrazione**.

OVERSAMPLING E INTERPOLAZIONE

Se vogliamo abbassare di un'ottava la riproduzione di una nota originale campionata, dovremmo imporre $FI = Fc/2$ raddoppiando il tempo di lettura fra due campioni, per cui $TI = 1/FI$, cioè $TI = 2/Fc$. La tecnica a frequenza fissa, che prevede invece $TI = 1/FI = 1/Fc$ ottiene lo stesso risultato aggiungendo tra due campioni originali uno fittizio (interpolazione), raddoppiando appunto il tempo di lettura FI , cioè $TI = 2/Fc$. In altre parole, per abbassare la frequenza e riprodurre le note più basse

rispetto all'originale bisogna aggiungere in fase di lettura dei campioni fittizi, viceversa per riprodurre le note più alte dell'originale, bisogna togliere in fase di lettura (sottrazione) un campione ogni due. Il processo di interpolazione può produrre una distorsione della forma d'onda campionata: più è buono il lavoro di interpolazione svolto dalla CPU e più il suono si avvicina all'originale.

Infatti un processore veloce, coadiuvato da un software che prevede il sovracampionamento (Oversampling), può generare una forma d'onda molto vicina a quella originale.

Il metodo migliore per ridurre il rumore provocato dall'aggiunta o dalla sottrazione di campioni è quello dell'oversampling che viene utilizzato quando la frequenza di lettura è uguale a quella di campionamento. L'oversampling consiste nell'introduzione in fase di lettura di una word fittizia tra word reali. Come risultato si ottiene che il DAC riceve il doppio delle word come se la frequenza di lettura fosse $F_l = 2 \times F_c$. Se si dispone di processori particolarmente veloci e di software di gestione sufficientemente sofisticato è possibile utilizzare le word fittizie interpolando con esse word reali. Per fare questo l'interpolazione lineare risulta il metodo più semplice perché crea una word fittizia mediando i valori di due word reali adiacenti.