

Pasquale Citera

Dipartimento di Musica Elettronica
 Conservatorio di Santa Cecilia
 via dei Greci 18
 Roma (IT)
[pasqualecitera81\[at\]gmail\[dot\]com](mailto:pasqualecitera81[at]gmail[dot]com)

Lezione IV**Il Suono Digitale
 La Teoria del
 Campionamento**

Nella quarta lezione è stata introdotta la teoria digitale del trattamento dei segnali partendo dalla differenza tra segnale analogico e segnale digitale, trattando il campionamento e la quantizzazione.

IL CAMPIONAMENTO**IL SEGNALE DIGITALE**

Fino ad ora l'esame dei diversi stadi della Catena Elettroacustica ha interessato soltanto il passaggio da fenomeno acustico a quello elettrico, in breve - va detto, con una serie di semplificazioni - abbiamo trattato esclusivamente il segnale Analogico. Per far sì che questo segnale sia elaborabile dai computer vi è bisogno di una conversione ulteriore detta Campionamento che codifica il segnale analogico in *Segnale Digitale* ovverosia numerico¹, in questo caso una serie di combinazioni di numeri binari.² Il segnale analogico cambiando ad ogni infinitesima variazione dell'onda acustica viene considerato come segnale **continuo** ovvero per quanto si possa prendere in esame una parte sempre più piccola di variazione dell'onda acustica, corrisponderà sempre una analoga variazione del segnale analogico. Quindi per rappresentare in modo esatto ed identico il segnale analogico, servirebbero tante serie numeriche quante le più microscopiche variazioni elettriche, insomma *infinite* serie di numeri binari. Dato che non è possibile acquisire e gestire

infiniti numeri, per rappresentare digitalmente un'onda acustica, si ricorre ad un processo di *discretizzazione*, ovvero immagazzinare una serie di numeri molto alta ma non infinita, una approssimazione sufficiente per ricostruire la sensazione sonora originale, col minimo errore di rappresentazione possibile. Per questo motivo, trattando il suono digitale si parla di segnale **discreto** per distinguerlo dal segnale continuo analogico.

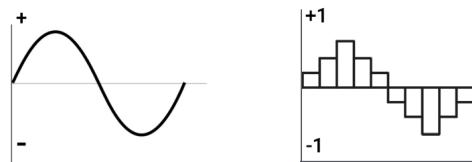


fig.11 Segnale Continuo e Segnale Discreto.

1. IL CAMPIONAMENTO

- Si intende quindi per **Campionamento** la tecnica che consiste nel convertire un segnale continuo nel tempo in un segnale discreto, valutandone l'ampiezza ad intervalli di tempo regolari in modo da ottenere una stringa digitale³ che approssimi quella continua originaria.

Questo processo si compone di due parti fondamentali; la discretizzazione nel tem-

¹Dall'inglese *digit*, cifra.

²Per approfondimenti sul sistema numerico binario, clicca [QUI](#).

³Sequenza di bit. Per approfondimenti clicca [QUI](#)

po (cioè lungo tutta la durata del suono) e la discretizzazione dell'ampiezza (quantizzazione).

1.1.1 FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO

La prima parte, quella detta propriamente *campionamento* ha come parametro chiave il numero di volte in un intervallo di tempo nel quale il segnale originario viene rilevato. Potremmo, per fare un esempio, comparare il processo di campionamento con il trattamento dell'immagine sulla pellicola cinematografica; l'illusione delle immagini in movimento viene realizzata tramite la successione di numerose fotografie che, riprodotte ad una velocità adeguata, dà un senso naturale di movimento anche se parate da fotogrammi statici. Così è anche per la sensazione sonora riprodotta da un processo di campionamento. Maggiore sarà il numero di *fotografie del segnale* in un secondo, più fedele sarà la ricostruzione del suono originale.

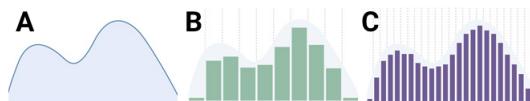


fig.12
A - Segnale Analogico
B - Frequenza di campionamento bassa
C - Frequenza di campionamento alta.

Il numero di informazioni (campioni) rilevate in un secondo viene indicato con la *frequenza di campionamento* ed è misurata, come per la frequenza del suono acustico, in Hertz (Hz) secondo il rapporto $f_c = \frac{1}{T}$ dove T è l'intervallo di tempo che intercorre tra una rilevazione e la successiva. Quindi considerando T pari ad un secondo, la frequenza di campionamento sarà uguale al numero di volte nel quale il suono viene

⁴Harry Nyquist, fisico e Claude Shannon, matematico; teorici che hanno sviluppato fondamentali studi sulla teoria dei segnali.

campionato in quel dato secondo (1 Hz = un valore al secondo; 100 Hz = 100 valori al secondo).

1.1.2 TEOREMA DI NYQUIST - SHANNON

Per continuare la similitudine con la pellicola cinematografica si noti che per rendere l'illusione del movimento fluido e naturale di una sequenza di immagini sono necessari almeno 24 fotogrammi al secondo. Per quanto riguarda l'audio digitale, la frequenza di campionamento minima per riprodurre correttamente un segnale è indicata nel teorema del campionamento noto come Teorema di Nyquist-Shannon⁴ che dice:

$$f_c > 2f_m$$

dove f_c è la frequenza di campionamento ed f_m è la massima frequenza dello spettro del segnale da campionare; il teorema stabilisce che *per rappresentare in modo adeguato un segnale analogico bisogna avere una frequenza di campionamento superiore al doppio della frequenza più alta contenuta nel segnale originale*.

Quindi se abbiamo un segnale analogico con la frequenza più alta pari a 20 Hz, la frequenza di campionamento giusta per rappresentarlo dovrà essere maggiore di 40 Hz (40 campioni- rilevazioni- in un secondo), se un segnale ha la frequenza massima di 1000 Hz, la frequenza di campionamento giusta non dovrà essere minore di 2000 Hz.

Normalmente, per decidere la frequenza di campionamento adeguata a riprodurre i segnali sonori, si fa riferimento al limite umano di percezione delle frequenze

che è, come già detto all'incirca sui 20000 Hz; la frequenza di campionamento minima per una giusta ricostruzione dei suoni analogici quindi viene fissata in base a questo limite, dunque non potrà essere inferiore al suo doppio ovvero 40000 Hz pena la distorsione del segnale originario con un effetto chiamato *Aliasing*⁵.

Alcuni esempi di frequenze di campionamento nell'uso comune e professionale:

| Frequenza di campionamento | Utilizzo |
|----------------------------|------------------|
| 8000 Hz | Telefono |
| 44100 Hz | Audio CD |
| 48000 Hz | DVD |
| 192000Hz | editing audio HD |
| 2822400Hz | Super Audio CD |

2. QUANTIZZAZIONE

Come per la frequenza di campionamento, anche i valori d'intensità del segnale analogico/continuo subiscono un processo di discretizzazione. Ad ogni campione rilevato dal campionamento del segnale si applica una stringa di bit che indica l'ampiezza di ogni frammento approssimandolo al più vicino valore discreto a disposizione per troncamento o arrotondamento. Questo processo d'approssimazione induce inevitabilmente una serie di errori nella ricostruzione dato che le variazioni di intensità in un segnale analogico sono infinite mentre invece la quantizzazione si attua con un numero finito di valori. Ne conviene che più alti saranno i valori (bit) a disposizione, maggiore sarà la precisione nella ricostruzione del segnale analogico, quindi minore l'errore di quantizzazione poiché il valore si approssimerà verso dimensioni sempre più piccole.

⁵Per approfondimenti clicca [QUI](#)

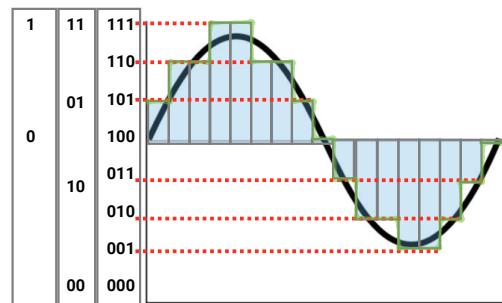


fig.13 Esempi di valori possibili con 1 bit, 2 bit, 3 bit.

Come si può notare dalla figura precedente, il numero dei valori di rappresentazione dell'intensità del segnale aumenta in modo esponenziale all'aumentare dei bit. Avremo quindi che a N -bit corrisponderanno 2^N possibili valori di quantizzazione, come indicato nella tabella seguente:

| Risoluzione (N-bit) | Valori (2^N) |
|---------------------|------------------|
| 2 bit | 4 |
| 4 bit | 16 |
| 8 bit | 256 |
| 10 bit | 1024 |
| 12 bit | 4096 |
| 14 bit | 16384 |
| 16 bit | 65536 |
| 18 bit | 262144 |
| 20 bit | 1048576 |
| 22 bit | 4194304 |
| 24 bit | 16777216 |

Come si è già detto, nella quantizzazione ogni campione viene quantizzato ad un valore che ne approssima il valore reale introducendo una inevitabile degradazione dovuta alla approssimazione che prende il nome di *rumore di quantizzazione*. Questo rumore si genera solo in presenza di un segnale campionato poiché in presenza di silenzio l'errore di quantizzazione è nullo. Questa caratteristica che può sembrare un aspetto positivo in realtà è un fattore al-

quanto negativo poiché l'oscillazione del rumore (presenza-assenza) viene rilevata dall'orecchio molto più facilmente di un rumore di sottofondo costante (come può essere il fruscio dei vecchi nastri magnetici, per esempio).⁶ Questo errore-rumore diminuisce con l'aumentare della risoluzione in bit come mostra la seguente tabella che rappresenta il rapporto segnale - rumore (SNR - *Signal to Noise Ratio*) indicato in decibel *full scale* (dB_{FS})⁷

| Risoluzione - bit | SNR - dB_{FS} |
|--------------------------|------------------------|
| 2 bit | -12 |
| 8 bit | -48 |
| 16 bit | -96 |
| 24 bit | -144 |

Bibliografia

- PIERO SCHIAVONI, Dispense del Corso di Tecniche di Registrazione e Diffusione del Conservatorio di Santa Cecilia, 2006-2009
- MAX V. MATHEWS, estratti da *The Technology of Computer Music*, Max V. Mathews, Joan E. Miller, F. R. Moore, John R. Pierce, J. C. Risset. M.I.T. Press, 1977
- HENRI POUSSEUR, *La Musica Elettronica*, Feltrinelli, Milano 1976

⁶Per ovviare a questo inconveniente, quando la risoluzione in bit è molto alta, si fa produrre ad un software dedicato, un rumore di fondo digitale costante chiamato *Dither* allo scopo di rendere meno percepibile l'oscillazione data dal rumore di quantizzazione.

⁷Dove 0 dB_{FS} indica il massimo possibile per un segnale digitale. Da non confondere con il dB_{SPL} dove lo 0 dB_{SPL} indica il limite minimo di percezione umana.