

Rappresentazione digitale del suono

Perché rappresentazione del suono

- Trasmettere a distanza nel tempo e nello spazio un suono
- Registrazione e riproduzione per tutti
- Elaborazione del segnale audio per i professionisti
- Flessibilità velocità ... costo

Da analogico a digitale

- Sistema analogico: sistema di rappresentazione approssimato
- Sistema digitale: sistema di rappresentazione preciso

Vantaggi del digitale

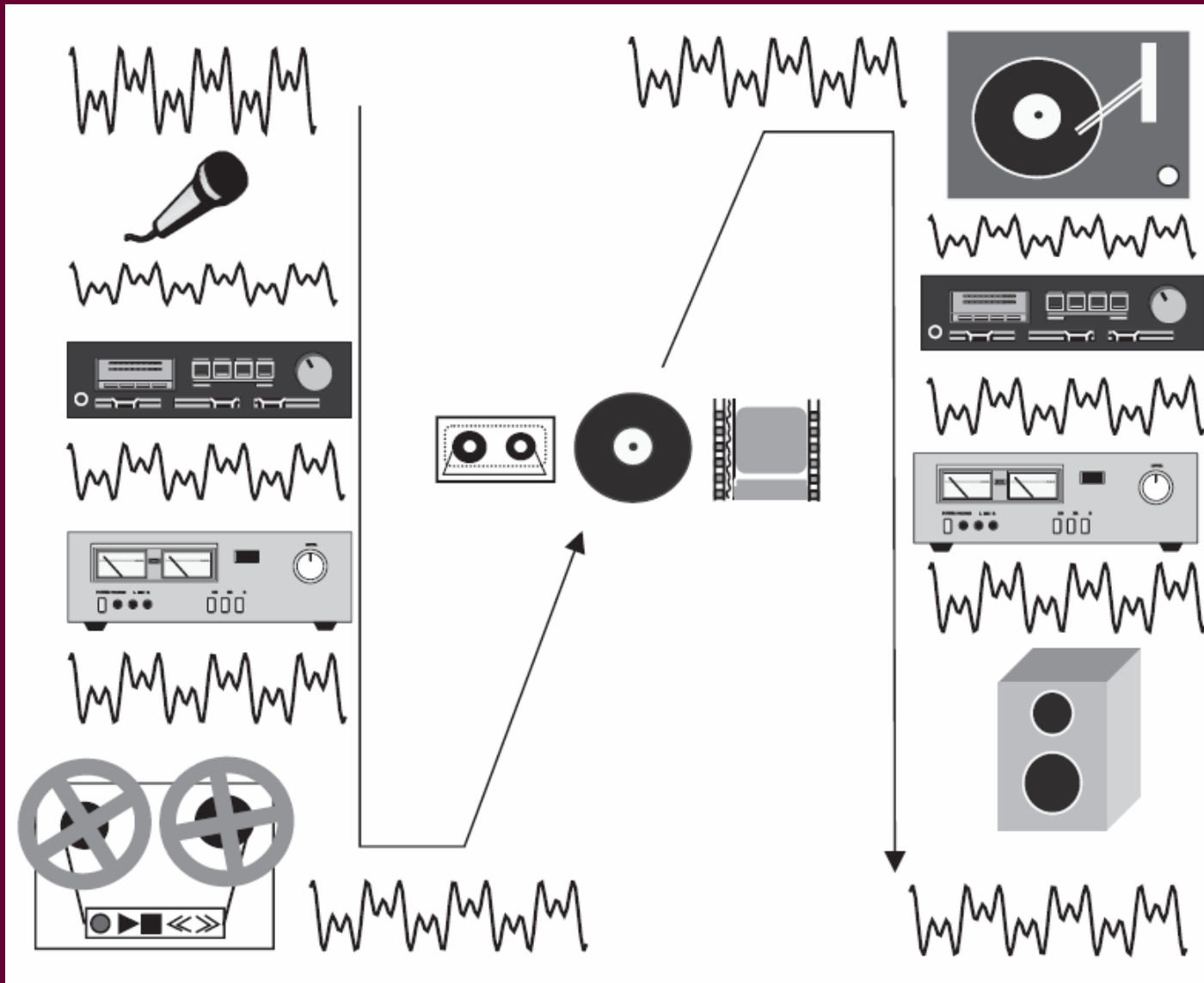
- copia del segnale identica all'originale
- non degradazione del segnale
- manipolazioni del segnale = operazioni aritmetiche "pulite"
- maggiori garanzie dai supporti standard (rilevamento/correzione errori - bit di parità)

Svantaggi del digitale

- Problemi dello scambio di dati con l'esterno dell'elaboratore
- Grandi capacità e ampiezza di banda per memorizzazione e trasmissione

Comunicazione dei segnali audio con il computer

Il suono analogico



Rapporto segnale/rumore (SNR)

SNR: rapporto tra ampiezza del segnale utile e ampiezza del rumore di fondo in un certo istante

$$\text{SNR} = \frac{\text{ampiezza segnale utile}}{\text{ampiezza rumore}}$$

$$\text{SNR} = 20 \log \left[\frac{\text{ampiezza segnale utile}}{\text{ampiezza rumore}} \right]$$

$$\text{SNR} = 20 [\log (\text{ampiezza segnale utile}) - \log (\text{ampiezza rumore})]$$

$$\text{SNR} = \text{ampiezza segnale utile}_{\text{dB}} - \text{ampiezza rumore}_{\text{dB}}$$

La gamma dinamica Dynamic Range (DR)

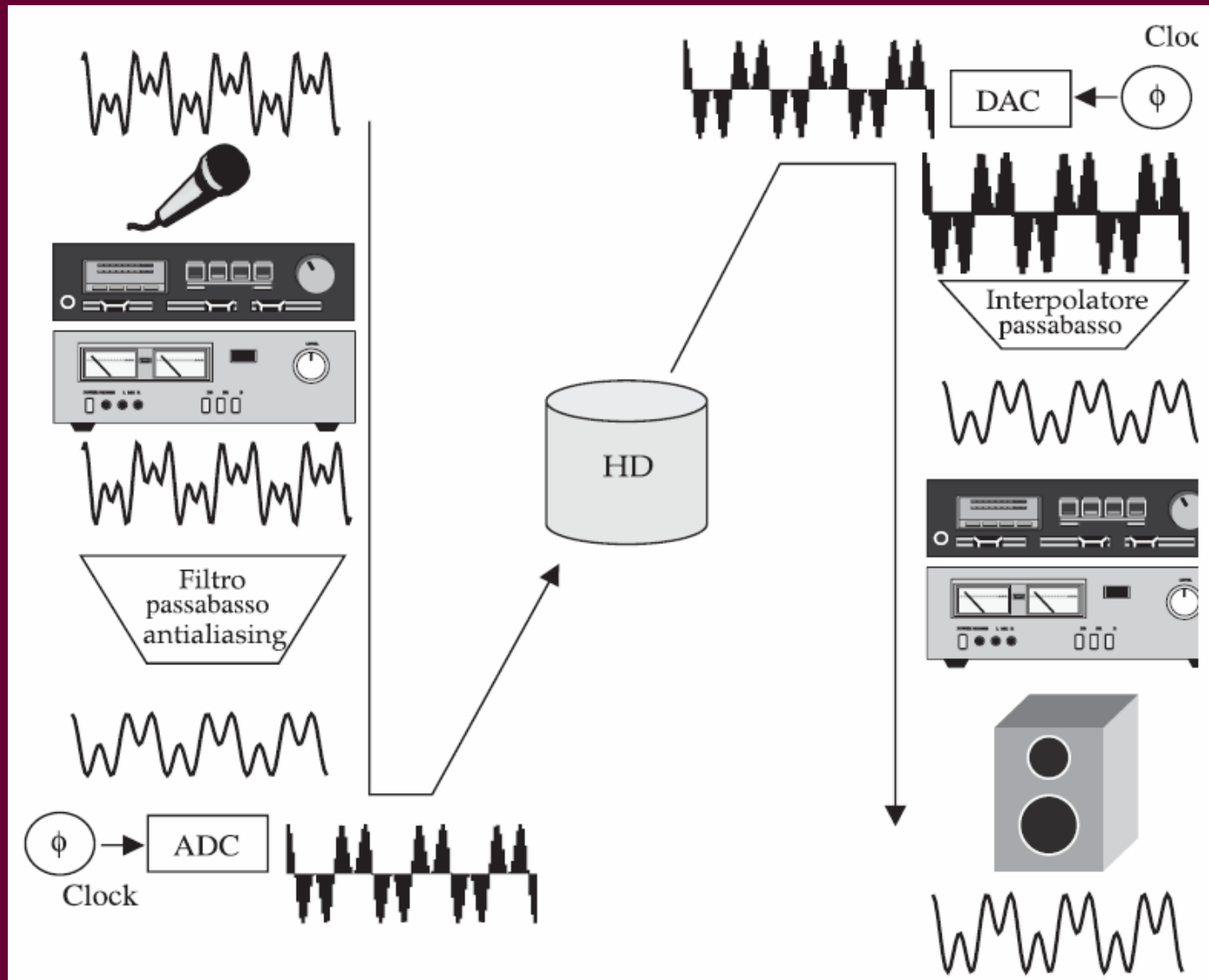
- Differenza in dB tra le ampiezze massima e minima del segnale utile
- ... cioè dato un sistema l'intervallo tra il picco che causa clip e la base di rumore di fondo presente

$$\text{Ampiezza-max}_{\text{dB}} - \text{Ampiezza-min}_{\text{dB}}$$

Schema di sistema audio digitale

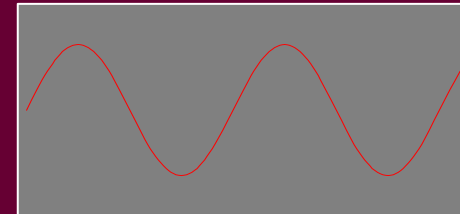


Il suono digitale



Conversione di formato

- due formati di rappresentazione del segnale
 - continuo (analogico), acustico o elettrico, esterno all'elaboratore
 - numerico (discreto), interno all'elaboratore
- descrizione: andamento dell'ampiezza in funzione del tempo
 - analogico: funzione continua
 - numerico: funzione discreta

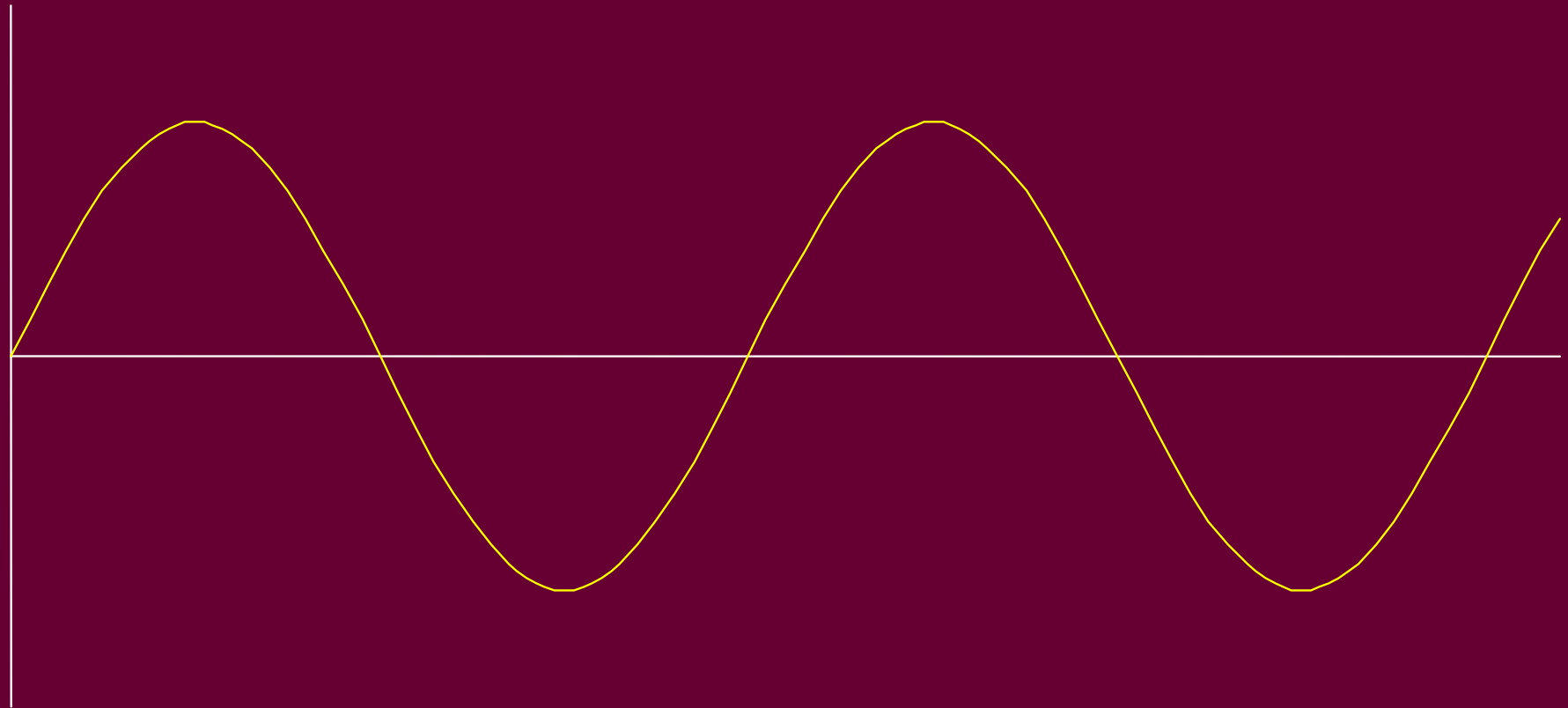


Conversione analogico-digitale

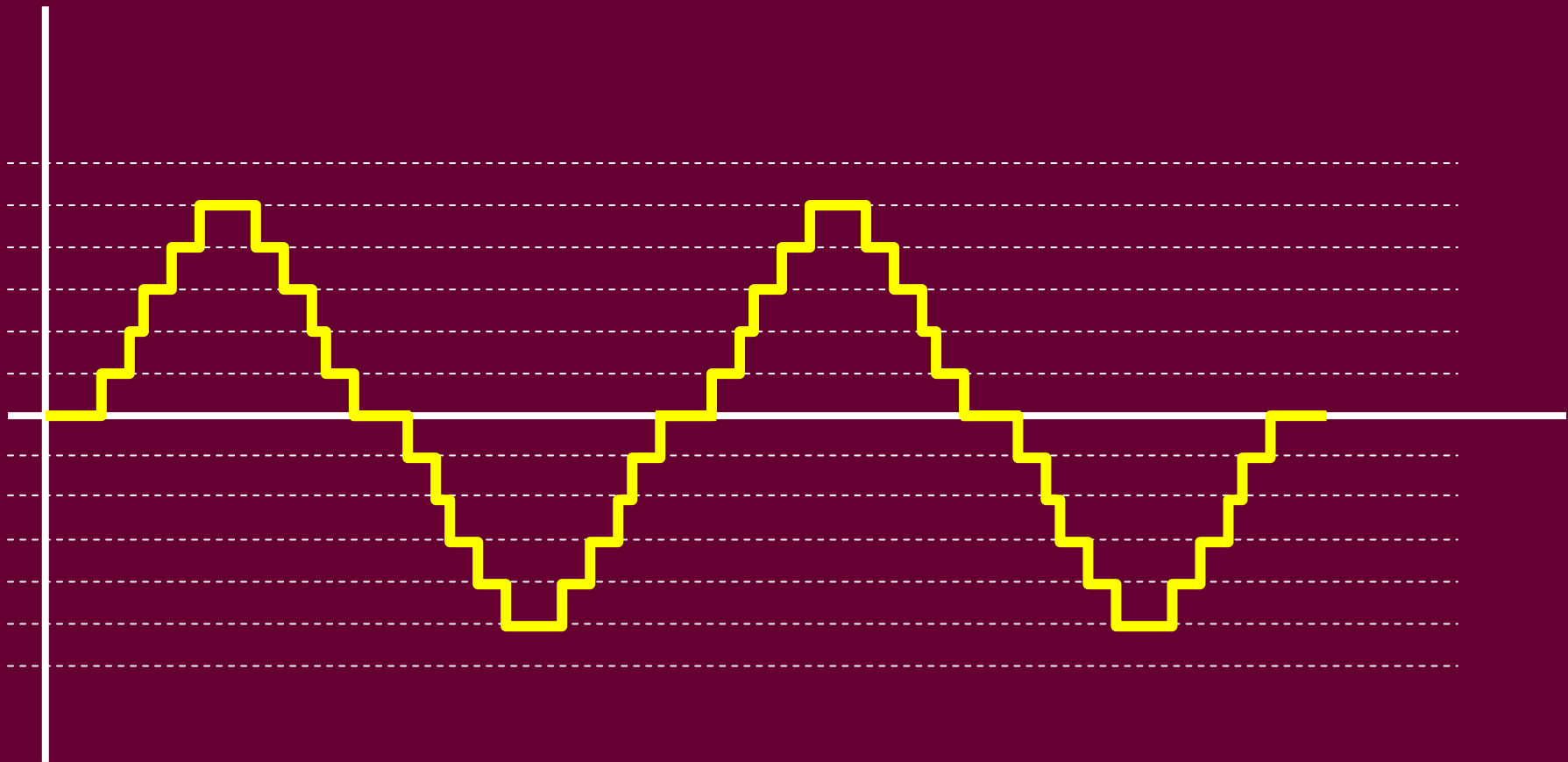
- Si trasforma una variazione di tensione elettrica in un segnale numerico
- Il segnale numerico esprime, istante per istante, il valore della tensione
- Due tipi di discretizzazione:
 - in ampiezza (quantizzazione)
 - nel tempo (campionamento)

Campionamento e quantizzazione

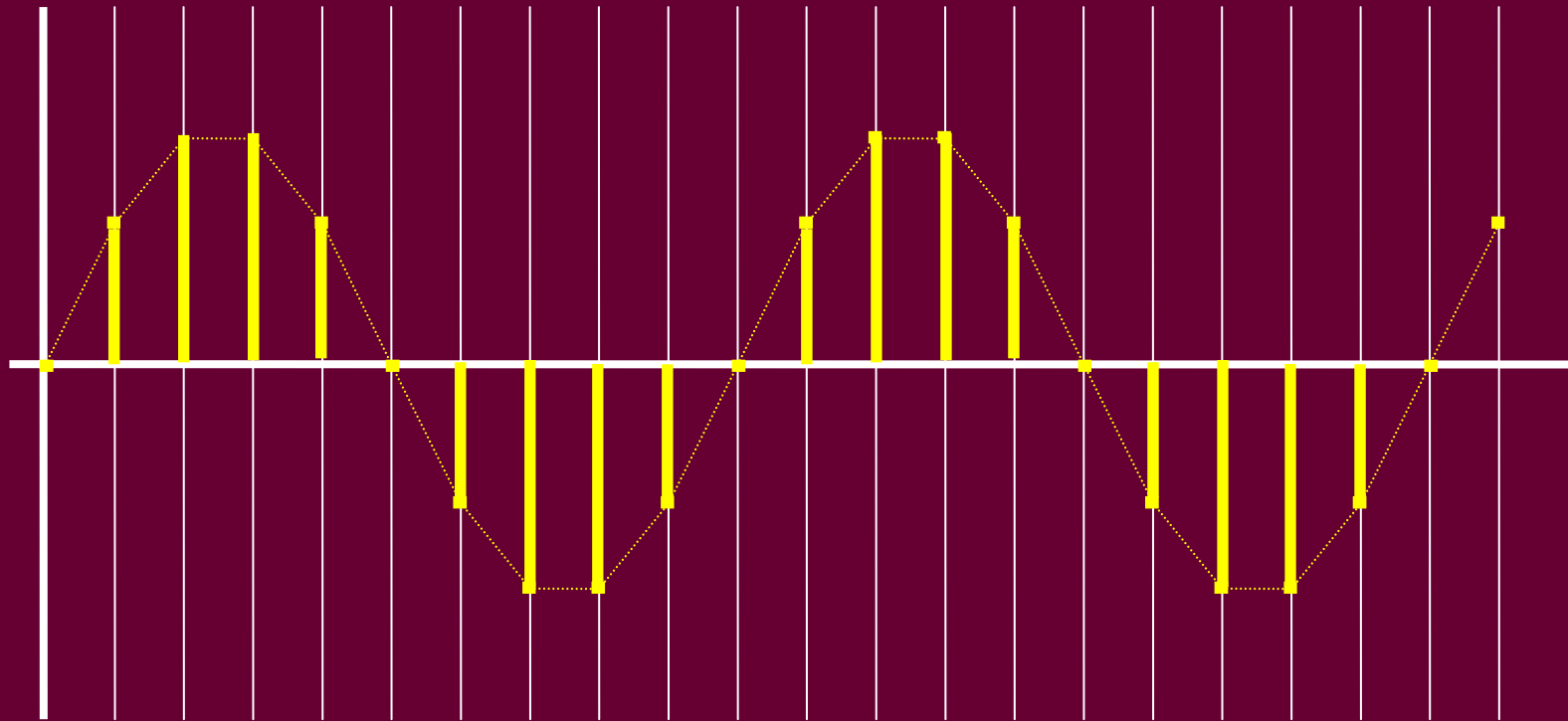
Segnale analogico (continuo nel tempo e in ampiezza)



Segnale quantizzato (discreto in ampiezza)

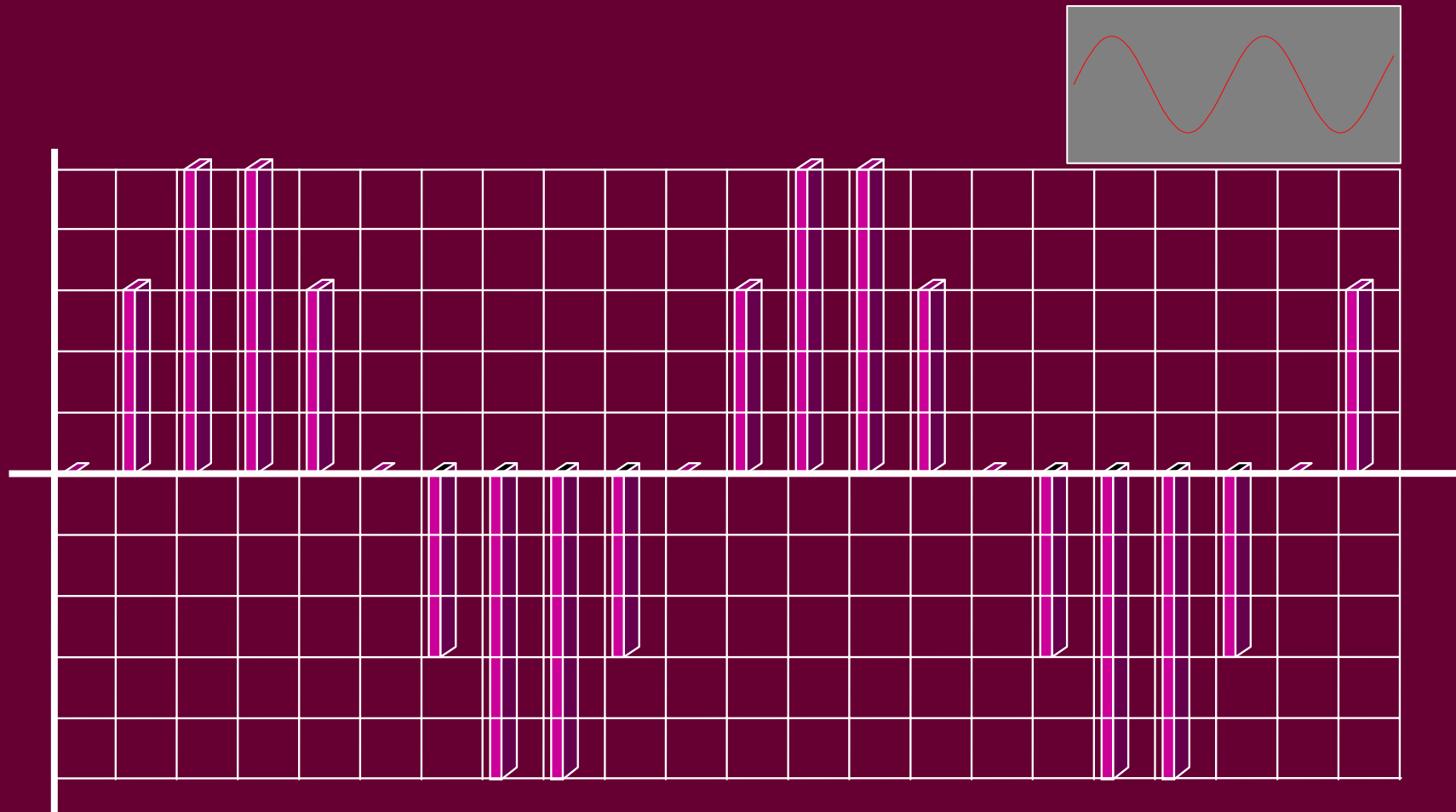


Segnale campionato (discreto nel tempo)

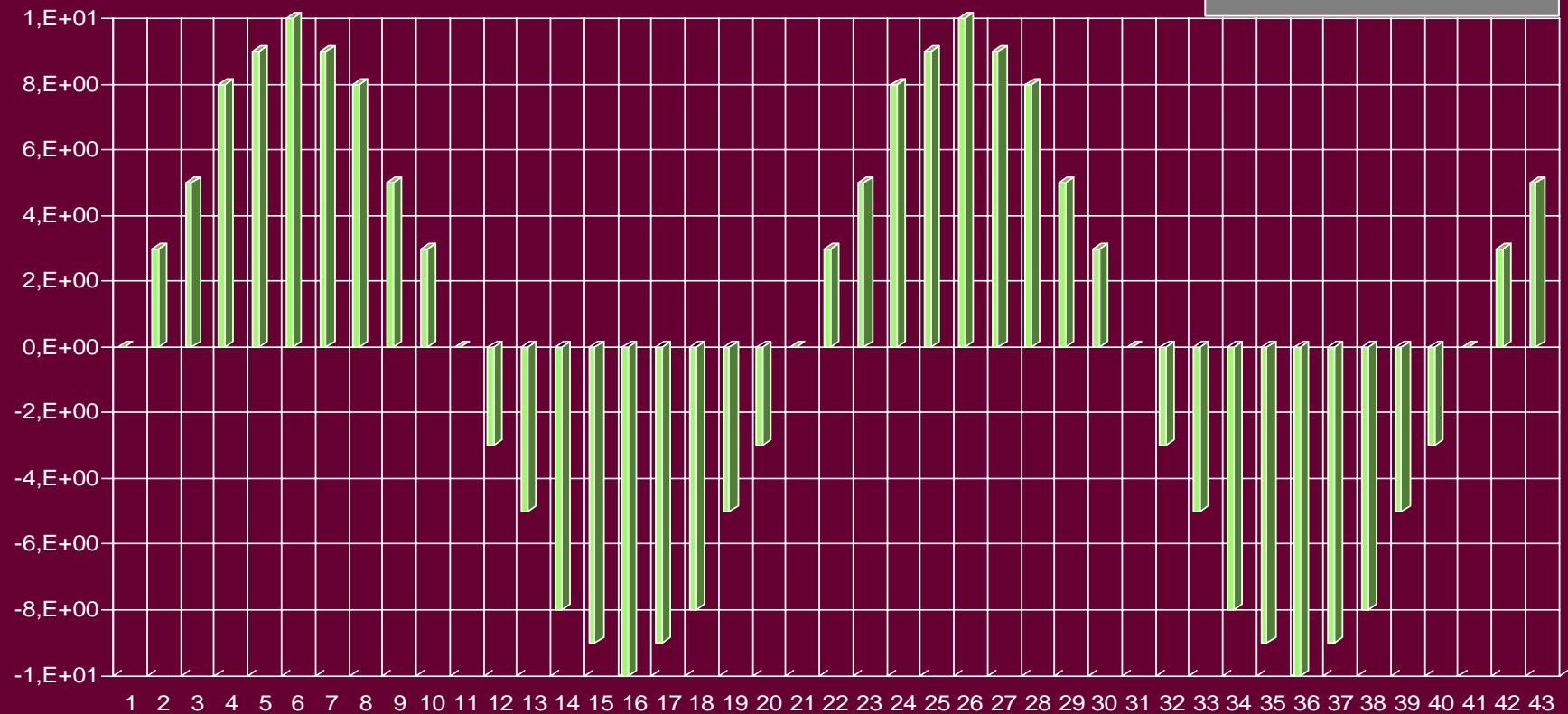
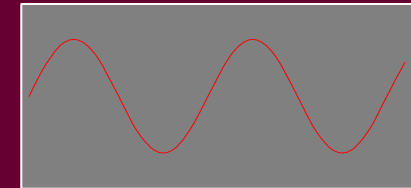


Segnale numerico (o digitale)

- discreto nel tempo e in ampiezza -



Quantizzazione e campionamento raddoppiati



La quantizzazione

Il problema

- si passa da tensione elettrica (continuo) a un dato numerico (discreto)
 - i valori di tensione variano con continuità su un certo intervallo
 - il dato numerico esprime il valore della tensione in un certo istante
- di quante cifre è composto il dato numerico?

Le parole binarie

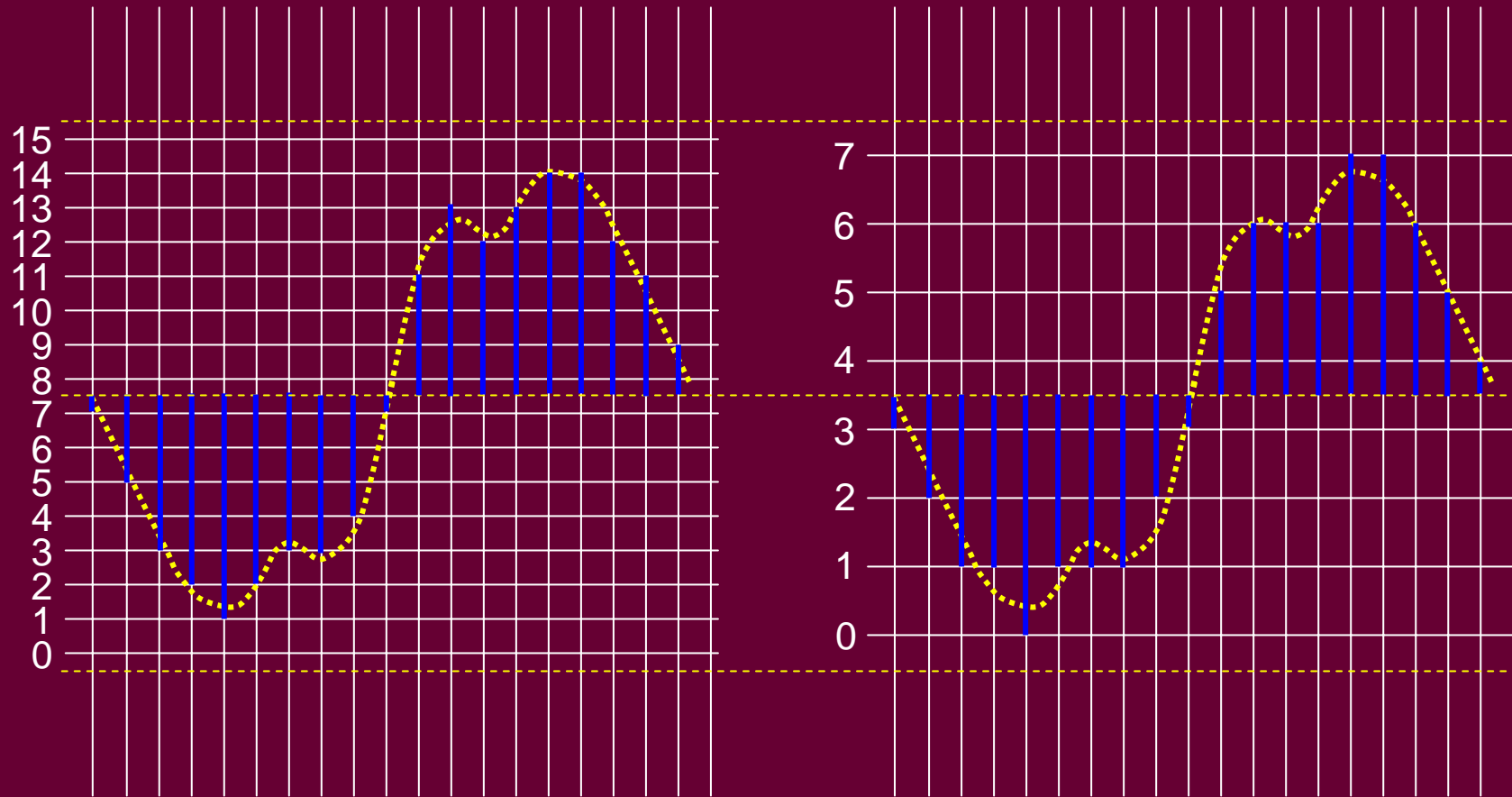
- Sequenze di bit (lunghezza n)
 - può assumere 2^n configurazioni diverse
 - cioè 2^n valori diversi
- Esempi:
 - $n=2$, $2^2=4$ valori (00, 01, 10, 11)
 - $n=3$, $2^3=8$ (000, 001, 010, 011, 100, ...)
 - ...

Qual è il numero di cifre che
garantisce la corretta
rappresentazione del segnale?

La quantizzazione vera e propria

- Assegna una sequenza di valori discreti per la descrizione di un segnale continuo
- Tanti più bit vengono usati, tanto più è accurata la descrizione
- Più sono i gradini, minore sarà l'*errore di quantizzazione* (o *rumore*)

Quantizzazione con 4 bit e 3 bit



Esempio

Segnale analogico tra -5V e +5V

Parole binarie di 8 bit

Regioni di quantizzazione:
 $10 / 2^8 \text{ Volt} = 10 / 256 \text{ Volt} =$
 $0,039 \text{ Volt}$

Tutti i valori di tensione di
una regione ampia 0,039V
saranno rappresentati dallo
stesso valore:
livello di quantizzazione

Valore di tensione	Parola binaria
[-5.000, -4.961]	00000000
[-4.961, -4.922]	00000001
[-4.922, -4.883]	00000010
[-4.883, -4.844]	00000011
...	00000100
...	...
...	...
...	11111011
[+4,844, +4,883]	11111100
[+4,883, +4,922]	11111101
[+4,922, +4,961]	11111110
[+4,961, +5,000]	11111111

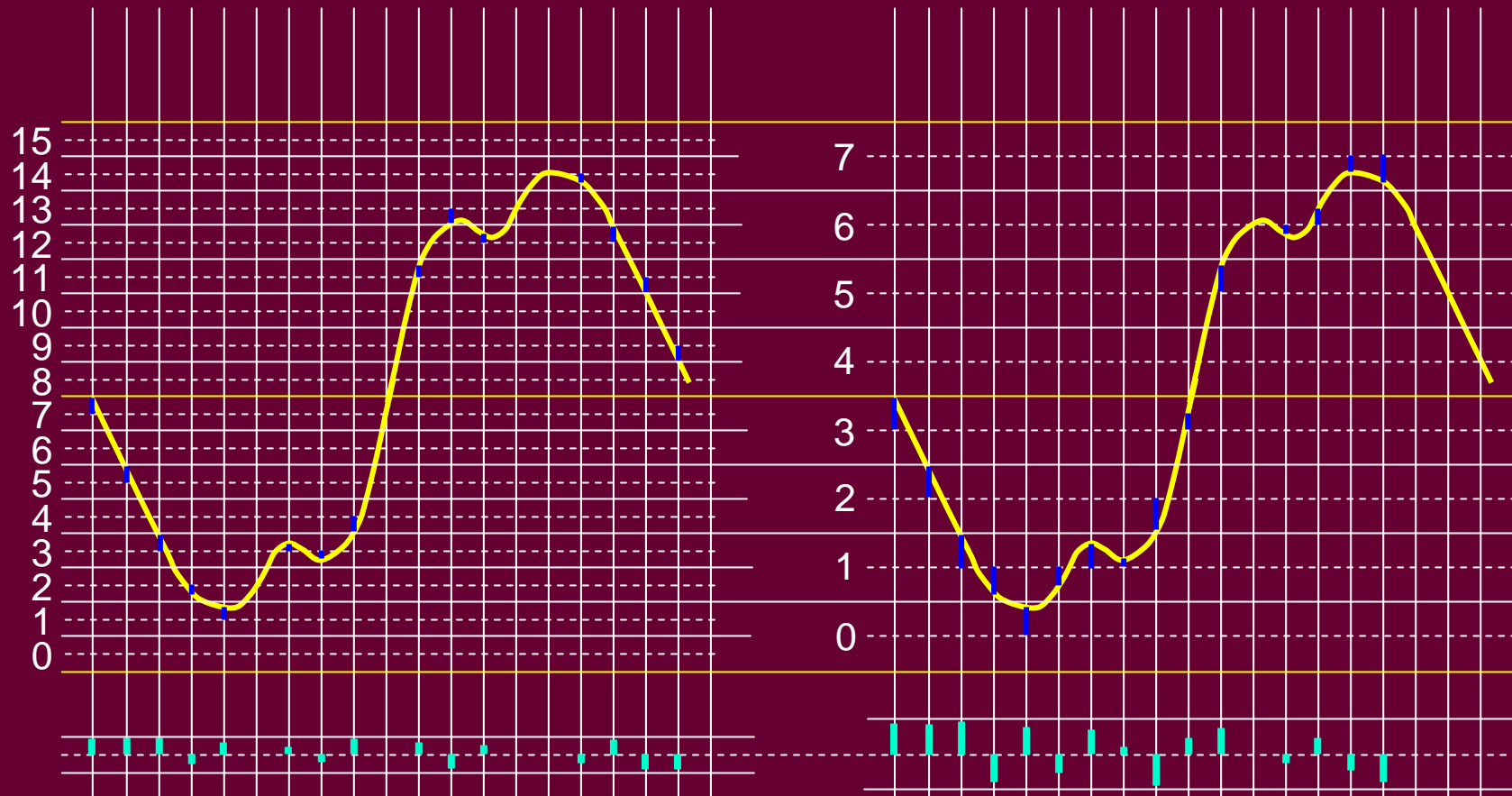
Il limite in precisione

- Segnale rappresentato = segnale effettivo + rumore
- Segnale analogico: differenze con il segnale effettivo = “rumore”
- Segnale digitale: “rumore” di quantizzazione

Errore di quantizzazione

- Differenza tra l'ampiezza del campione reale e l'ampiezza quantizzata
- L'ampiezza quantizzata è la metà della regione (si usa in riproduzione)
- L'errore di quantizzazione è al più la metà della regione di quantizzazione

Quantizzazione con 4 e 3 bit



Errore di quantizzazione

Rumore di quantizzazione

- L'errore di quantizzazione è distribuito casualmente
- E' un segnale che si aggiunge al segnale utile
- Si parla di “rumore di quantizzazione”

Esempi

- Quantizzazione con 16 bit
- Quantizzazione con 8 bit

Valutazione dei sistemi di rappresentazione

Rapporto segnale-rumore

Gamma dinamica

Contributo di un bit a SNR

- Se il numero di bit è almeno 6 o 7 ...

$$\text{SNR} = 2^N$$

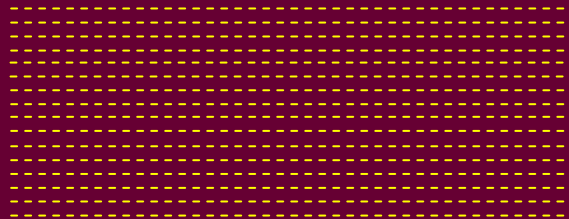
- In decibel
 - $\text{SNR} = 20 \log 2^N \text{ dB} = N \cdot 20 \log 2 \text{ dB} = 6.02 \cdot N \text{ dB}$
 - Ogni bit contribuisce con circa 6 decibel
- Esempio
 - $N=16$ bit
 - $\text{SNR} = 16 \cdot 6 \text{ dB} = 96 \text{ dB}$

Contributo di un bit a DR

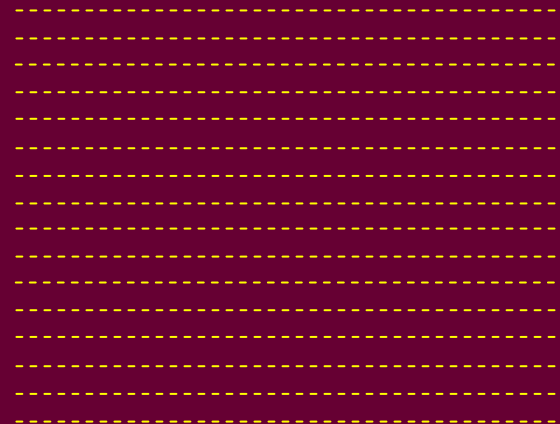
- L'aggiunta di un bit raddoppia la gamma dinamica dei valori



3 bit, 8 valori



4 bit, 16 valori

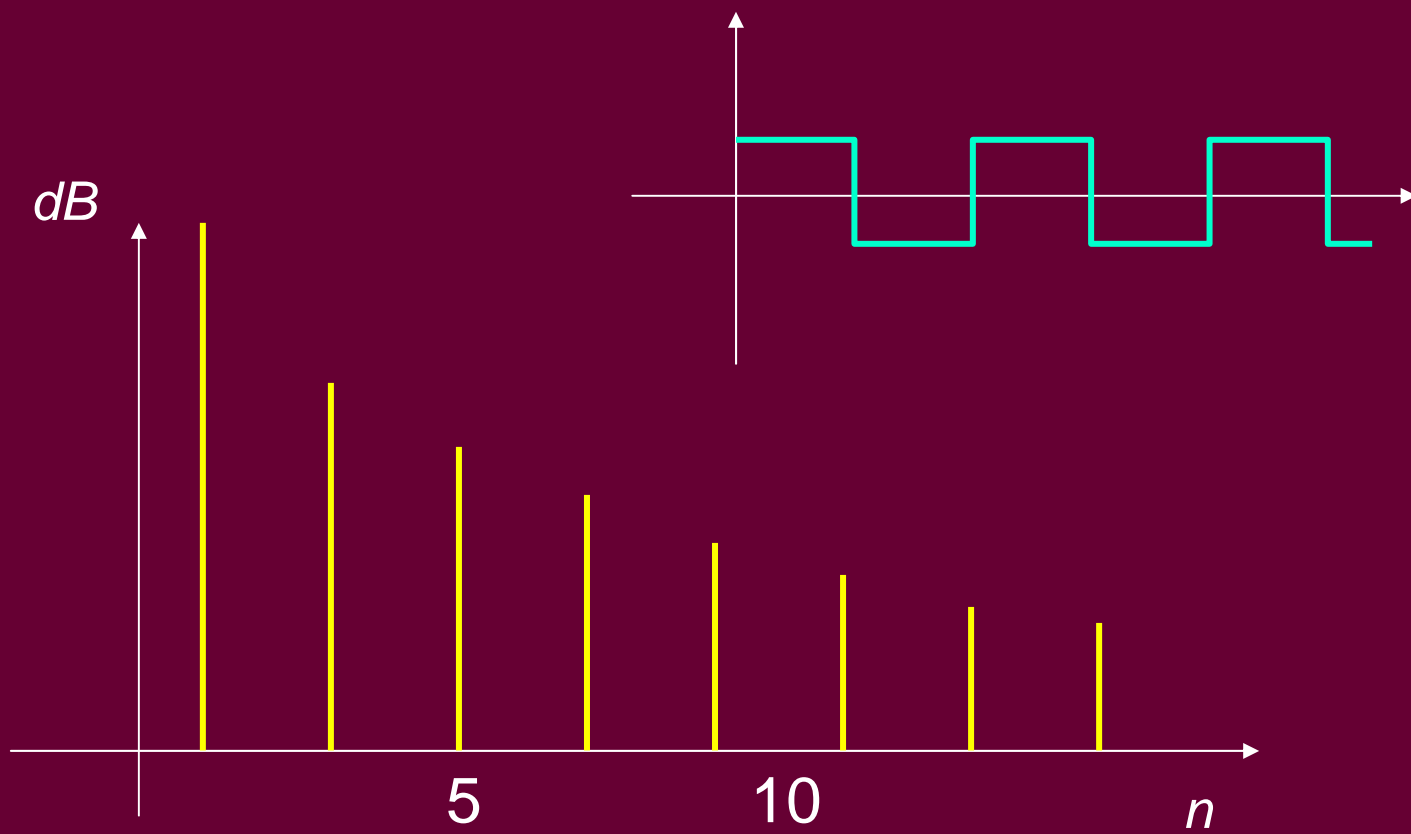


Dithering

Problema alle ampiezze minime

- Un sistema digitale non presenta alcun rumore per segnale di input nullo
- Problemi a livelli vicini allo 0 (non nulli)
- FLIP dell'ultimo bit: 0-1-0-1-0-1- ...
- Onda quadra: alte armoniche artificiali
- Effetti indesiderati sulle estinzioni dei suoni: aliasing

Onda quadra



Forza bruta

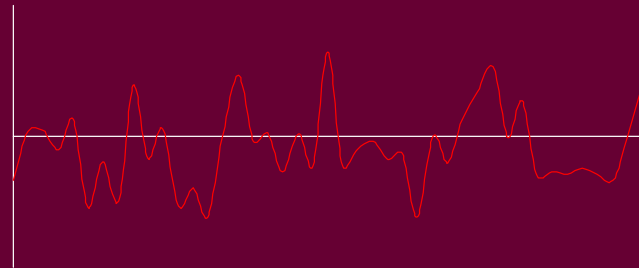
- L'aumento del numero di bit fa aumentare ...
 - il rapporto segnale/rumore SNR
 - il costo delle apparecchiature necessarie
- Oppure uso di tecniche a basso costo

Una correzione strana: il dithering

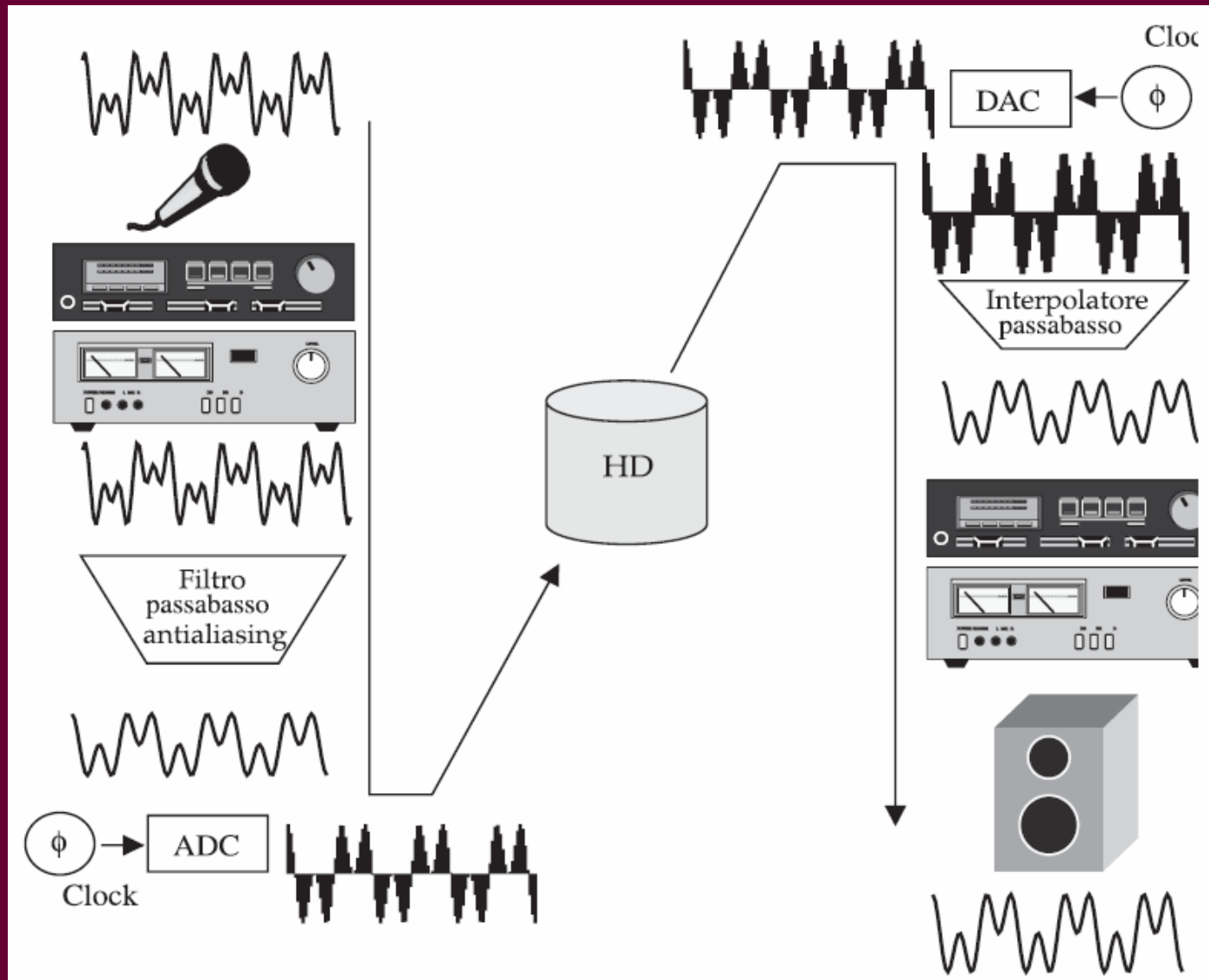
- Prima dell'azione di conversione AD, si introduce un po' di rumore analogico bianco
- Il livello del rumore è minimo (ad esempio, 3 dB, più o meno l'errore)

Rumore bianco

- Composizione spettrale molto ricca:
rumore di eccitazione – dither noise
- E' indipendente dal segnale da quantizzare
- Sistemi audio di buona qualità a basso costo



Riassumendo



Il campionamento

Il problema

- Occorre discretizzare il tempo (*periodo di campionamento*)
- Segnali audio variano rapidamente nel tempo
- Con che velocità si prelevano i campioni?

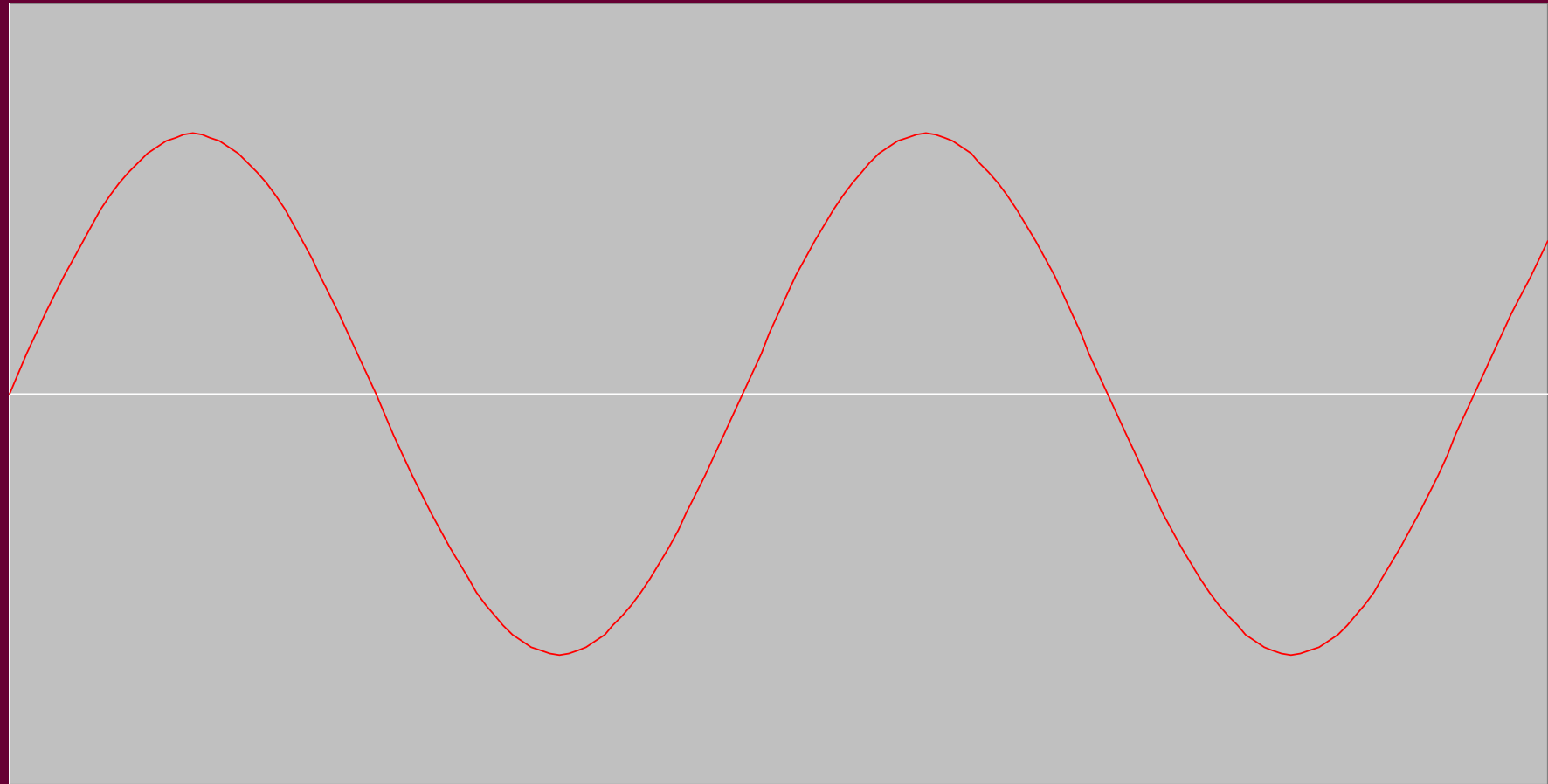
Considerazioni intuitive

- Velocità di prelevamento campioni dipende da velocità variazione segnale
- Velocità di variazione dipende da componente armonica più alta
- Quindi, frequenza massima determina il periodo di campionamento
- Al limite (periodo infinitamente piccolo) i segnali analogico e digitale coincidono

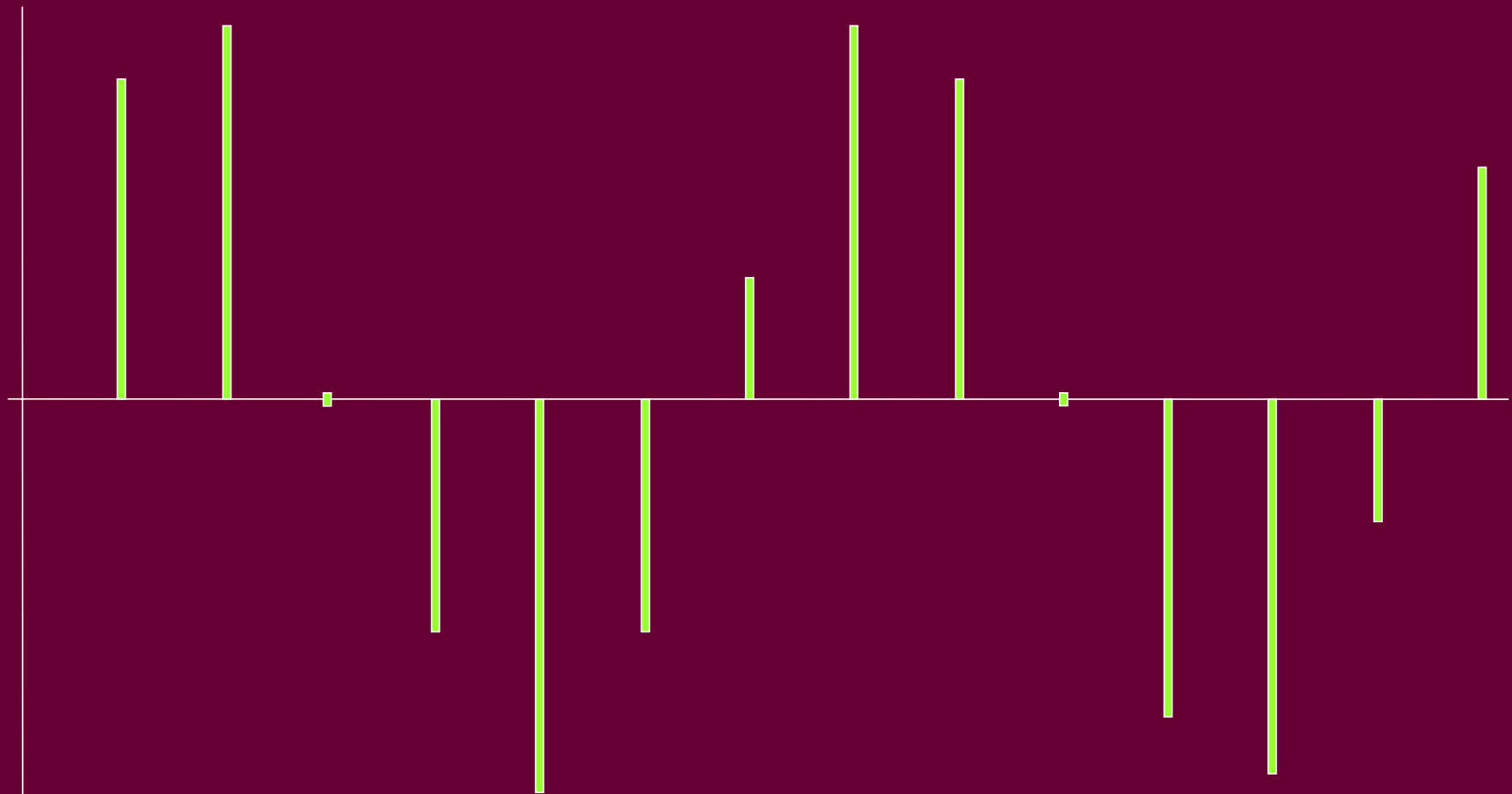
Il campionamento vero e proprio

- Dopo ogni periodo di campionamento si preleva un campione
- Si *quantizza* il segnale analogico in quell'istante
- Si *codifica* una sequenza di parole binarie che rappresenta l'andamento del segnale

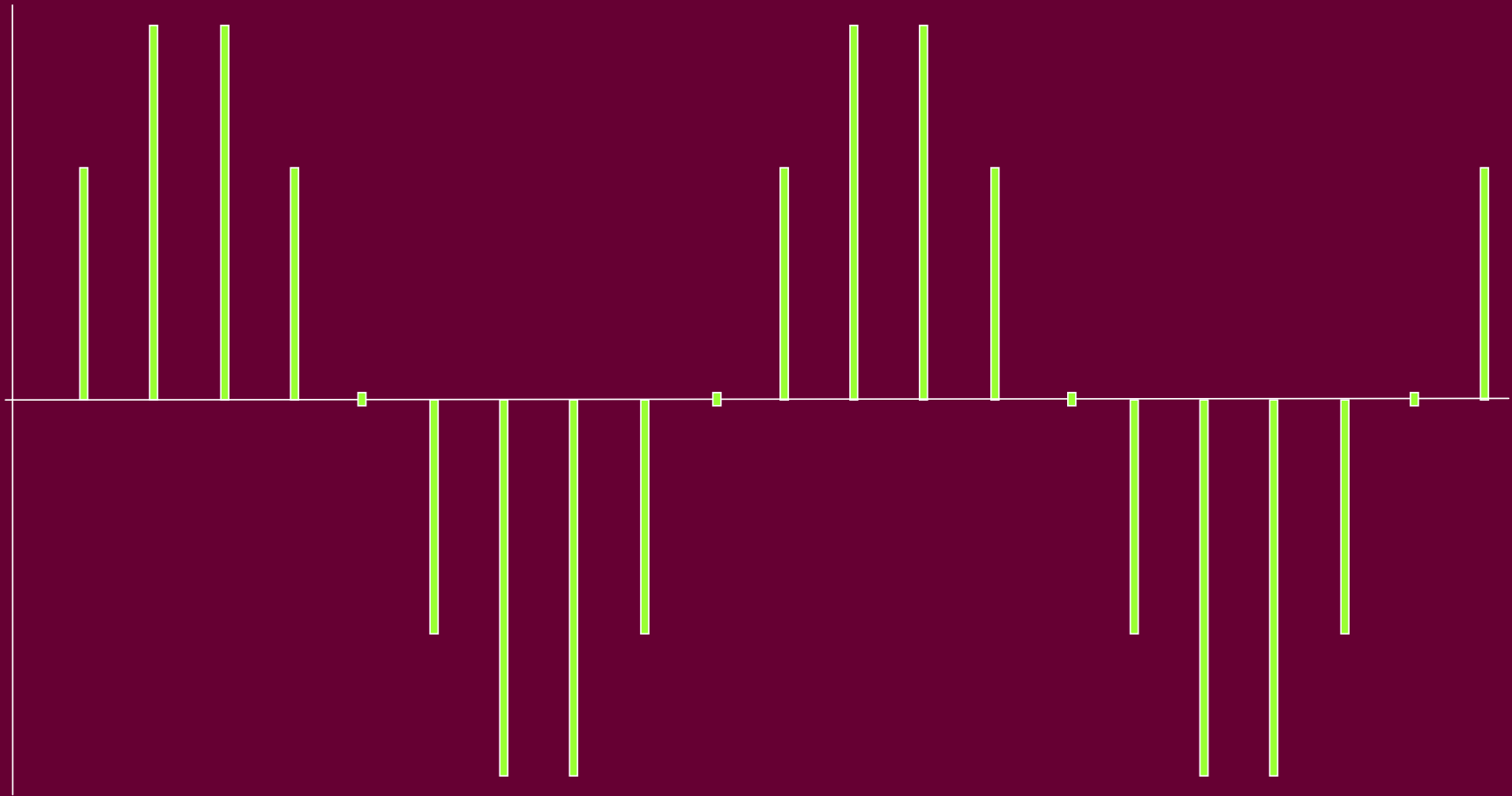
Campionamento di segnale (il segnale sorgente)



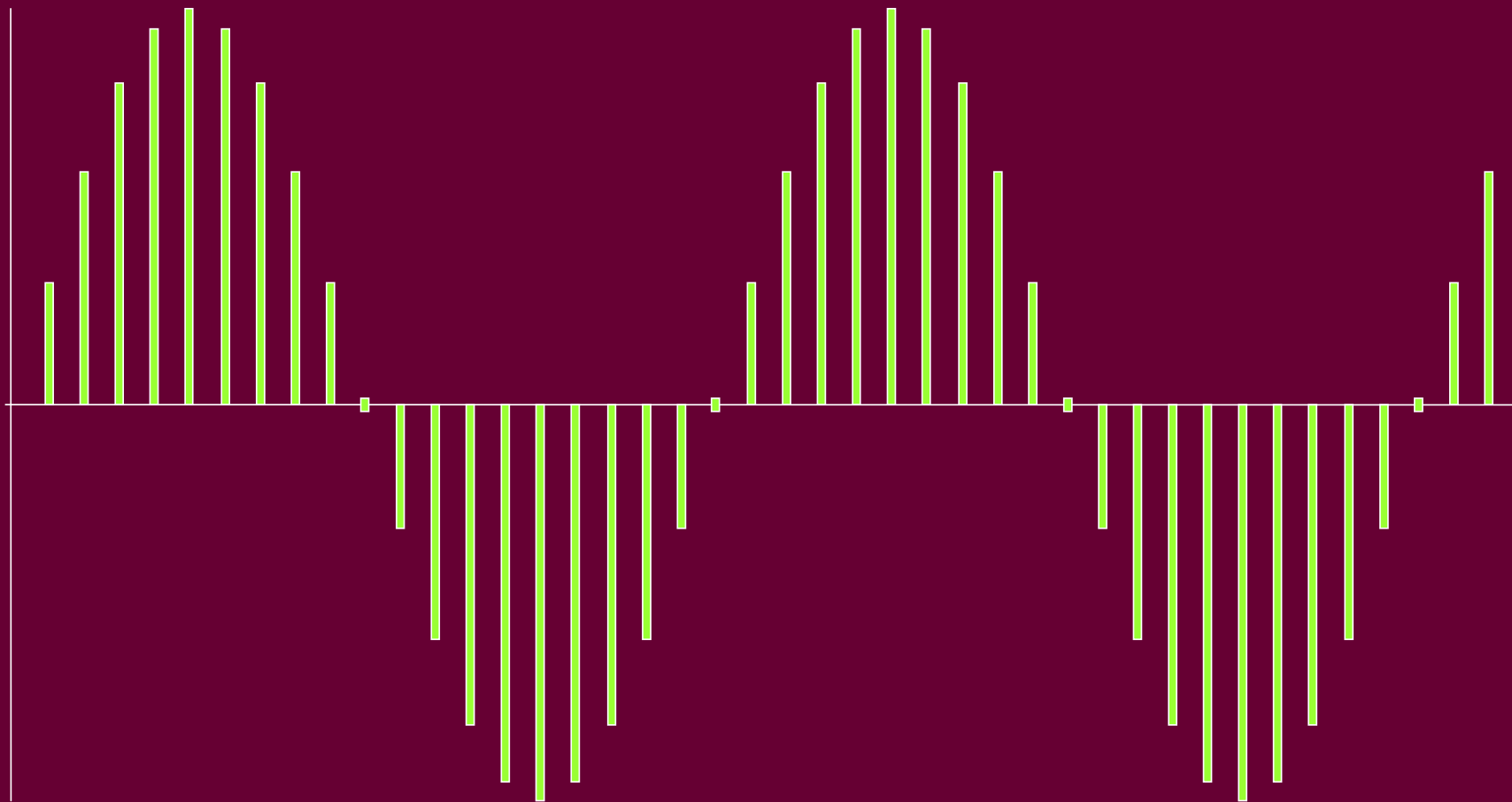
Campionamento di segnale (campionamento con frequenza f)



Campionamento di segnale (campionamento con frequenza $2f$)



Campionamento di segnale (campionamento con frequenza $3f$)



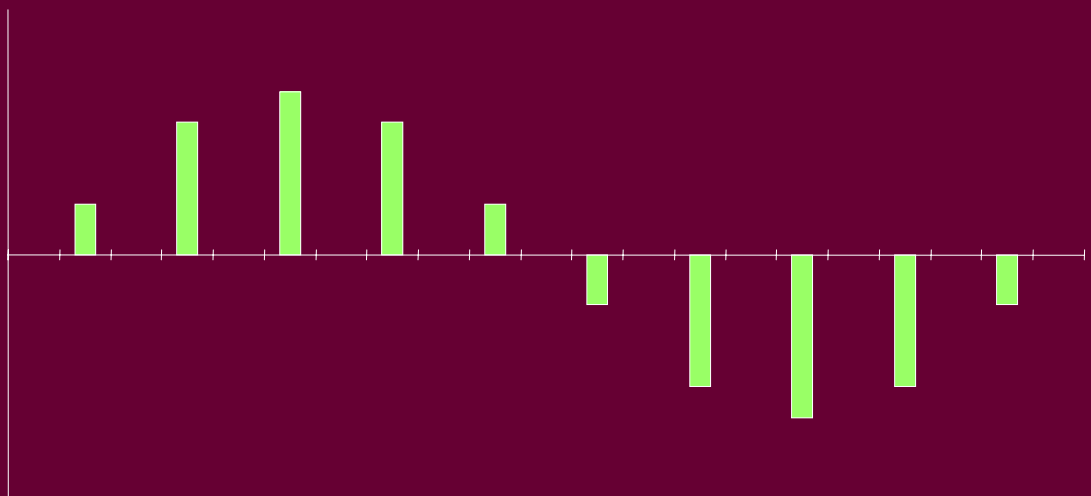
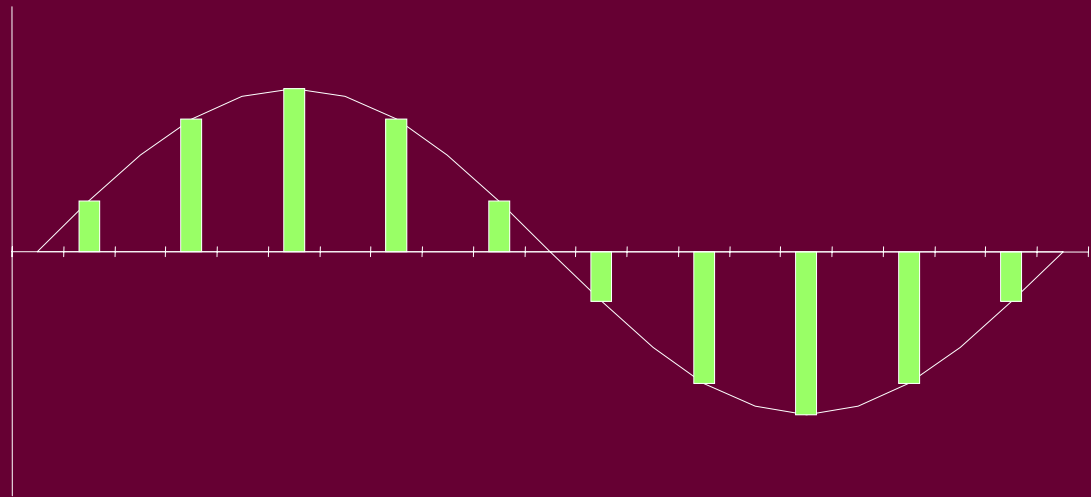
La dimensione degli intervalli

- Maggiore frequenza di campionamento, più accurata descrizione del segnale
- Come si fa a non avere perdita di informazione ?
- Qual è il minimo valore della frequenza di campionamento ?

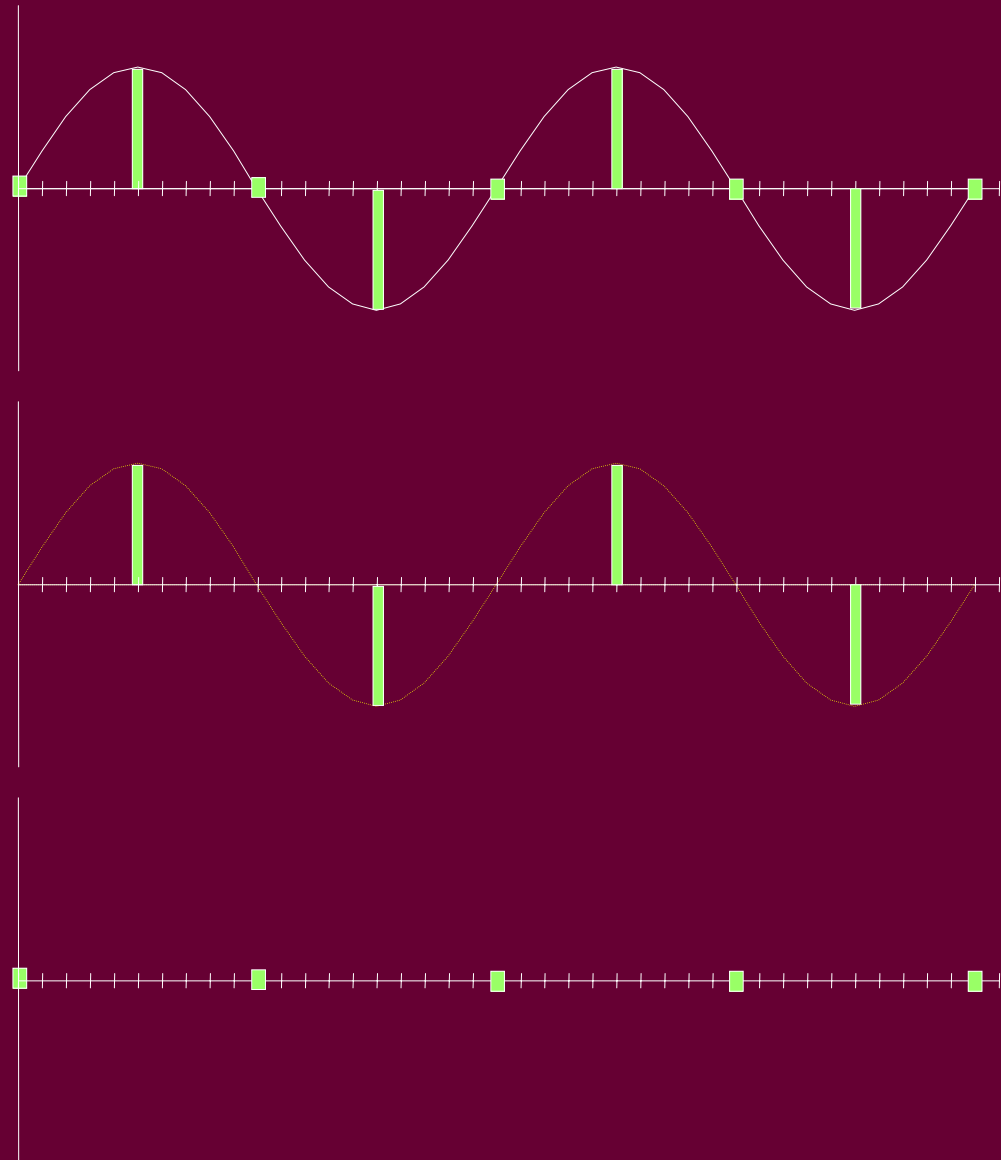
Il foldover o aliasing

- Sia f_c la frequenza di campionamento
- Sia f una frequenza presente nel segnale in ingresso tale che $f > f_c / 2$
- Si “inventa” una frequenza nuova (alias)
- Come avviene ciò?

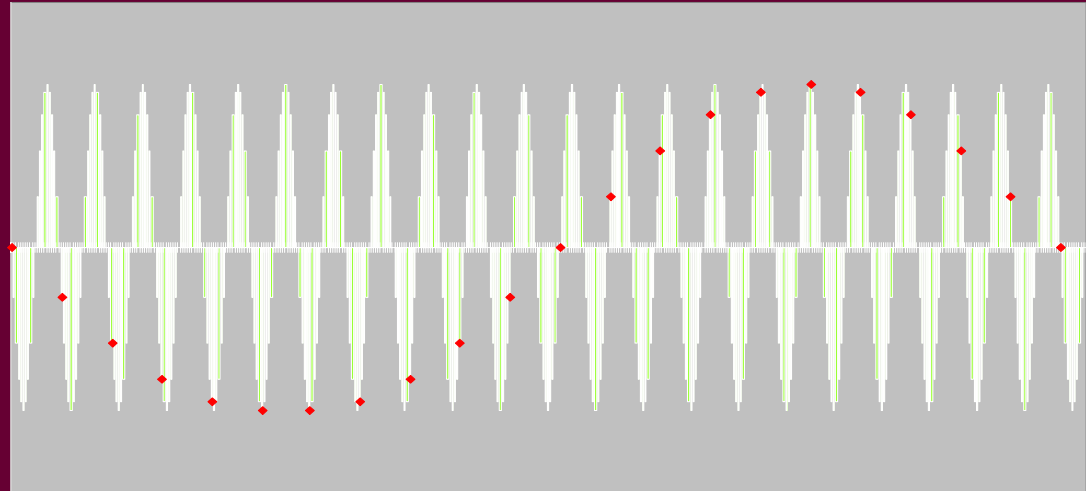
Un campionamento corretto



Un campionamento critico



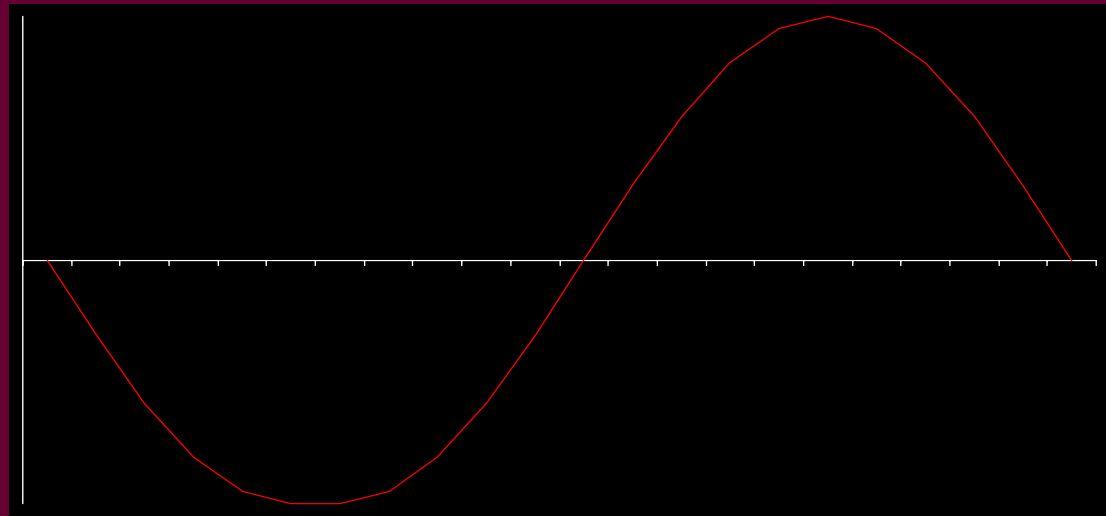
Un campionamento scorretto: aliasing!



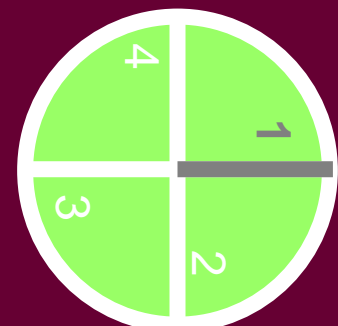
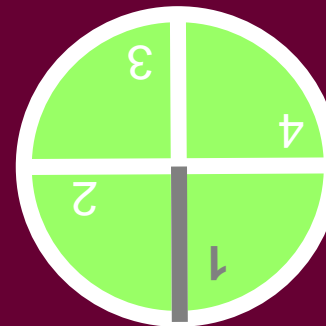
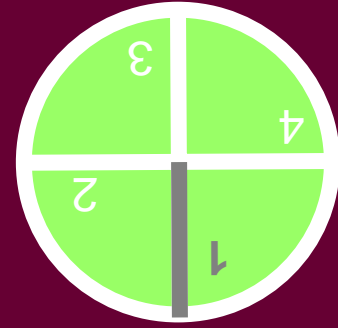
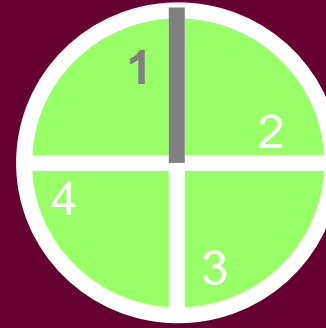
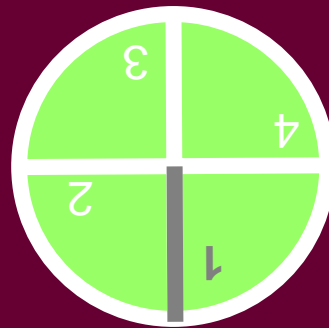
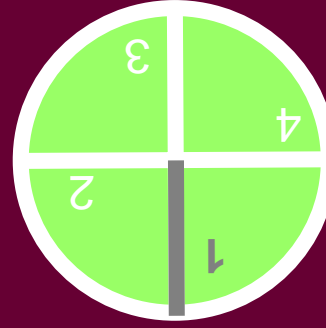
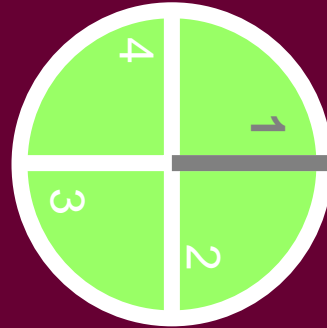
Esempio:

f_c un po' meno di f

$f_c = 955$ campioni/sec
 $f = 1000$ Hz



La metáfora del cine



La frequenza “aliased”

- frequenza ricostruita $f_r = f + kf_c$
- k intero, tale che $-f_c/2 < f + kf_c < f_c/2$

due casi:

- f nell'intervallo: $-f_c/2 < f < f_c/2$, $k=0$ $f_r=f$
- f fuori intervallo: $f < -f_c/2$, $f > f_c/2$, $k=?$

Esempi

- Esempio: $f_c=10000$ Hz, $f=4000$ Hz
 - $k=0$, $f_r = 4000$ Hz
- Esempio: $f_c=10000$ Hz, $f=6000$ Hz
 - $k=-1$, $f_r = -4000$ Hz
- Esempio: $f_c=955$ Hz, $f=1000$ Hz
 - $k=-2$, $f_r = 1000 - [2000/955] 955 = 45$ Hz
- In generale, $k = - [2f / f_c]$, $f_r = f - [2f / f_c] f_c$

Esempi di aliasing

- Frequenza di campionamento 8000 Hz
- Segnale sinusoidale 2000 Hz
- Segnale sinusoidale 5998 Hz ...
 - Per $k=-1$, $f_r = f_c - f = 8000 - 5998 = 2002$
 - Fenomeno dei battimenti

Esempi di aliasing

- Glissando
 - Da 20 Hz a 30.000 Hz
 - Durata 30 secondi
 - Frequenza di campionamento 44.100 Hz

La frequenza di Nyquist

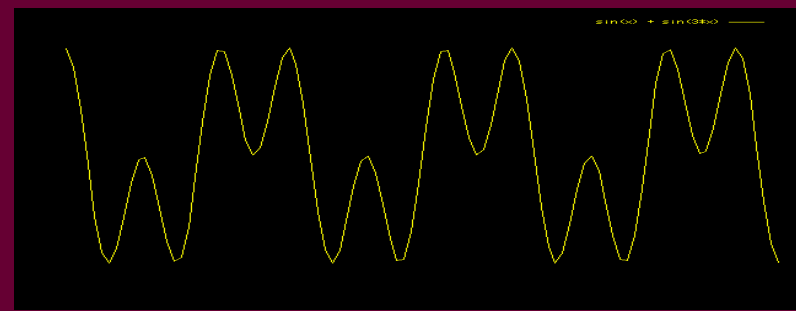
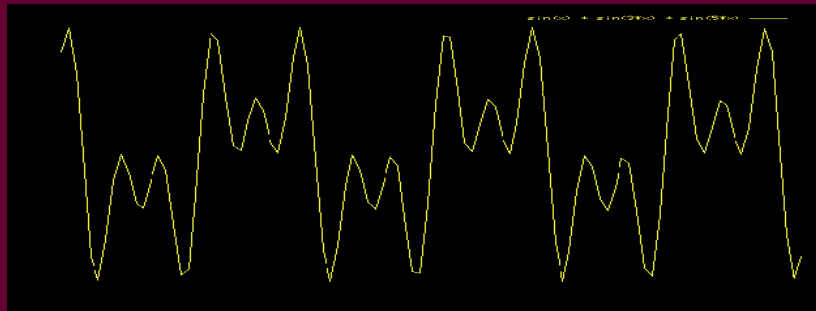
- In un periodo il segnale cambia direzione due volte
- Sono necessari almeno due campioni per periodo
- La frequenza di campionamento deve essere almeno il doppio della frequenza max presente

Si inverte il problema

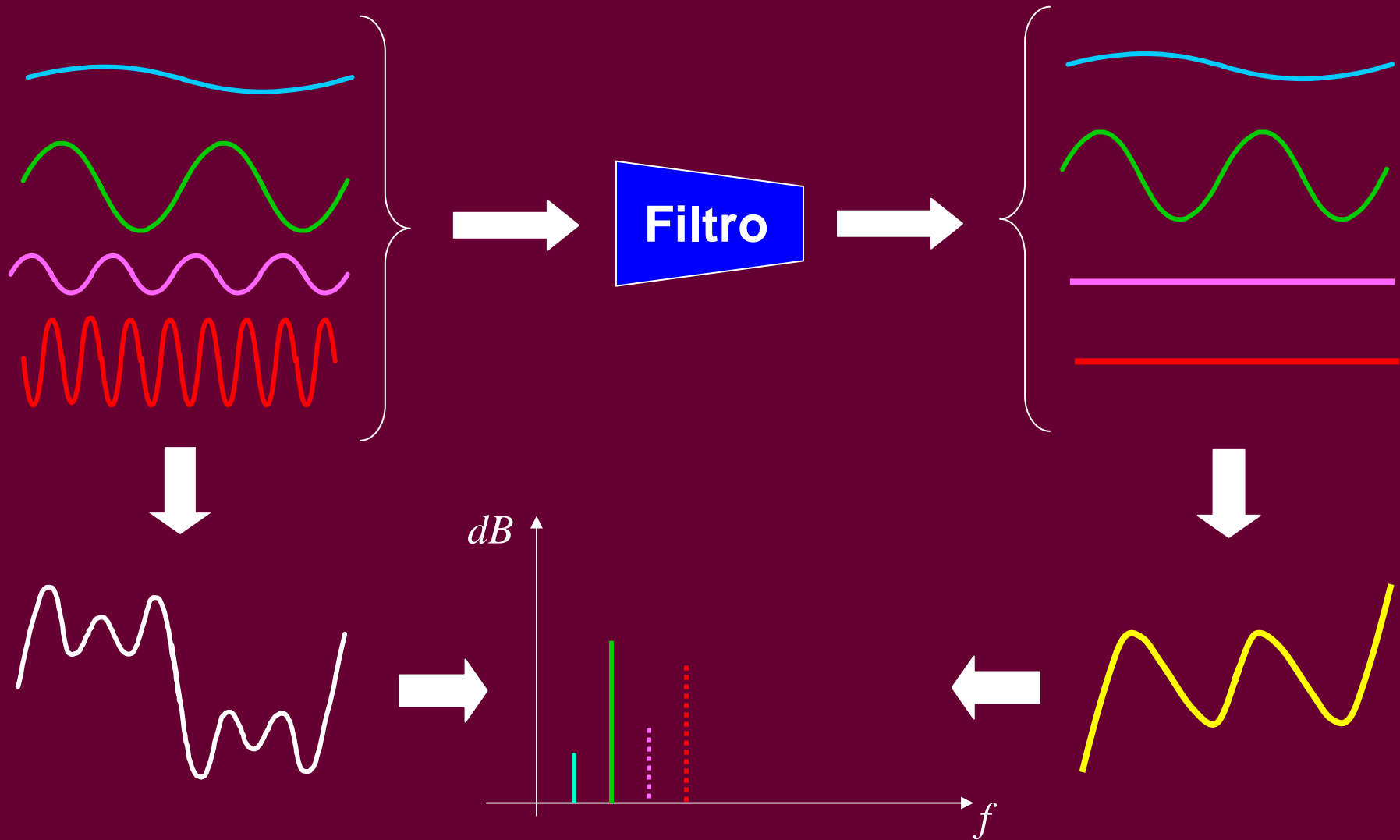
- Si fissa la frequenza di Nyquist
- Si fa in modo che nel segnale in ingresso non vi siano frequenze superiori alla metà della frequenza di Nyquist
- Filtro passabasso

Filtro passa-basso

- Elimina tutte le frequenze superiori a un certo valore (la metà della frequenza di campionamento)
- Il valore è detto frequenza di *cut-off*



Filtro passa-basso

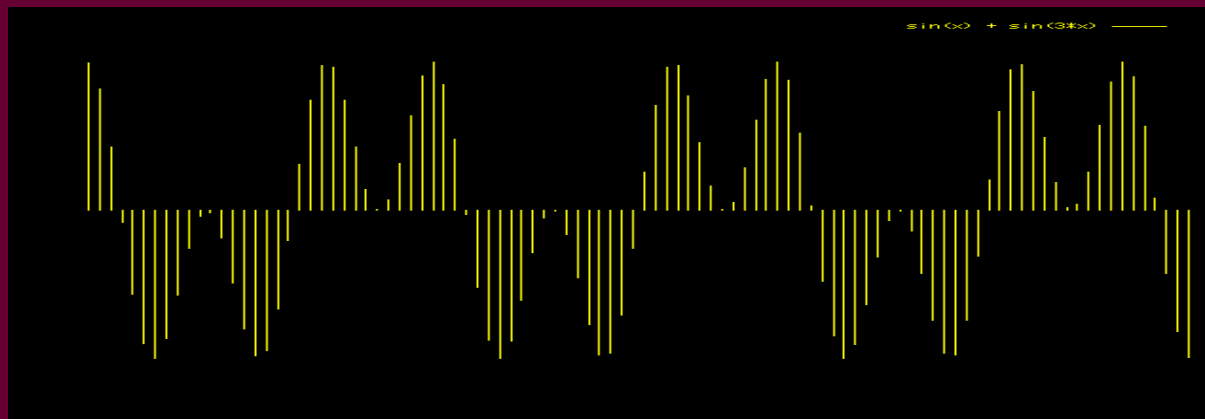


Dati pratici

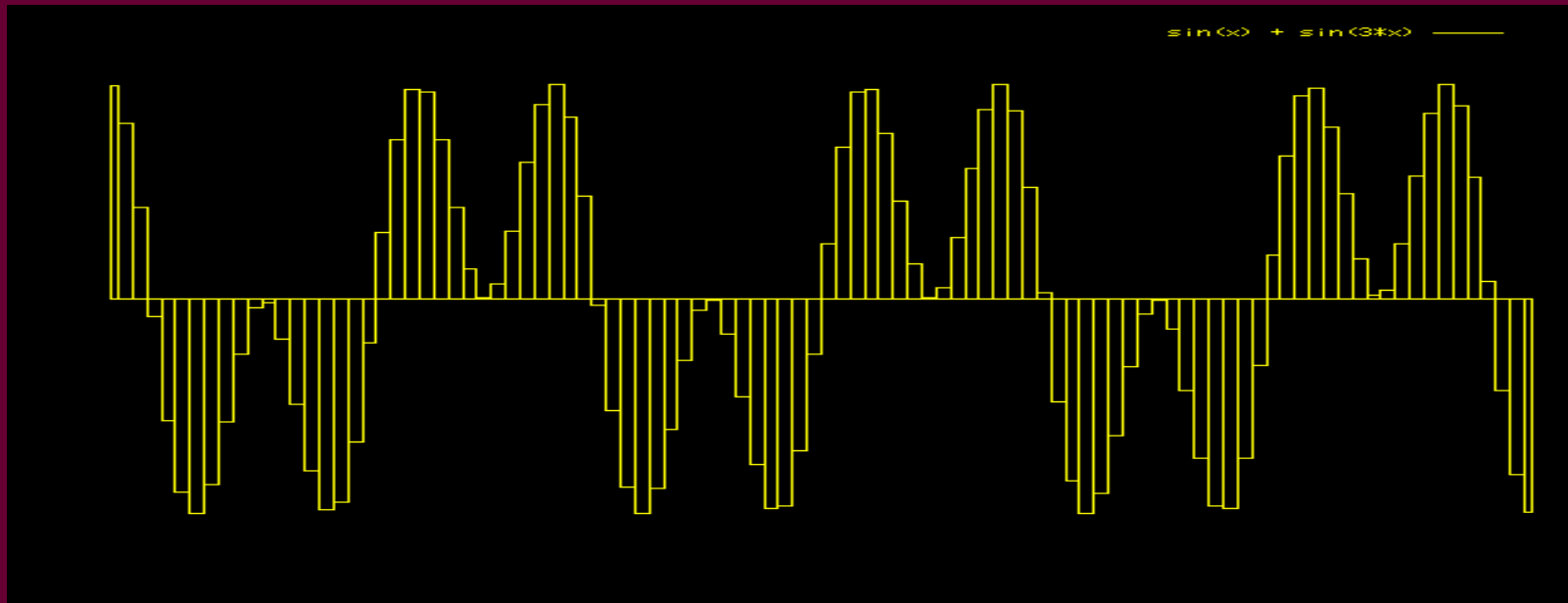
- Max frequenza udibile 20 KHz
 - campionamento oltre i 40 KHz
 - 44,1 kHz è la frequenza usata per il CD
- Tuttavia, dibattiti ancora in corso

Ricostruzione del segnale analogico

- Segnale campionato composto da barre non connesse tra loro
- In teoria, il suono originale analogico potrebbe cambiare tra due barre
- Magia del suono digitalizzato

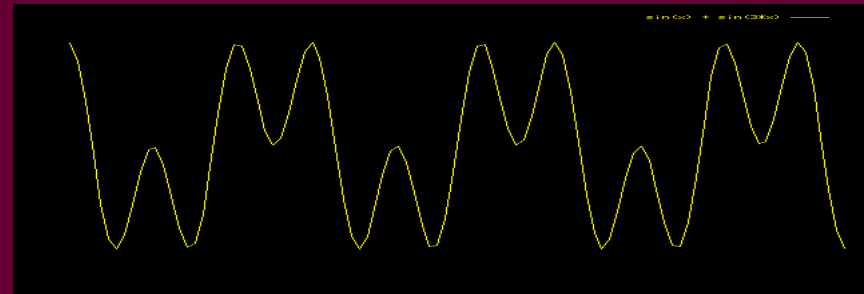
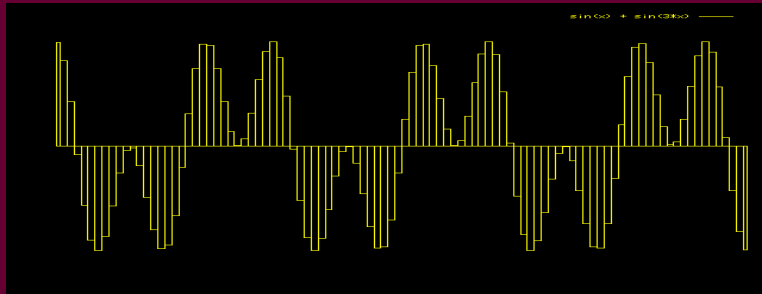


Cosa produce il DAC

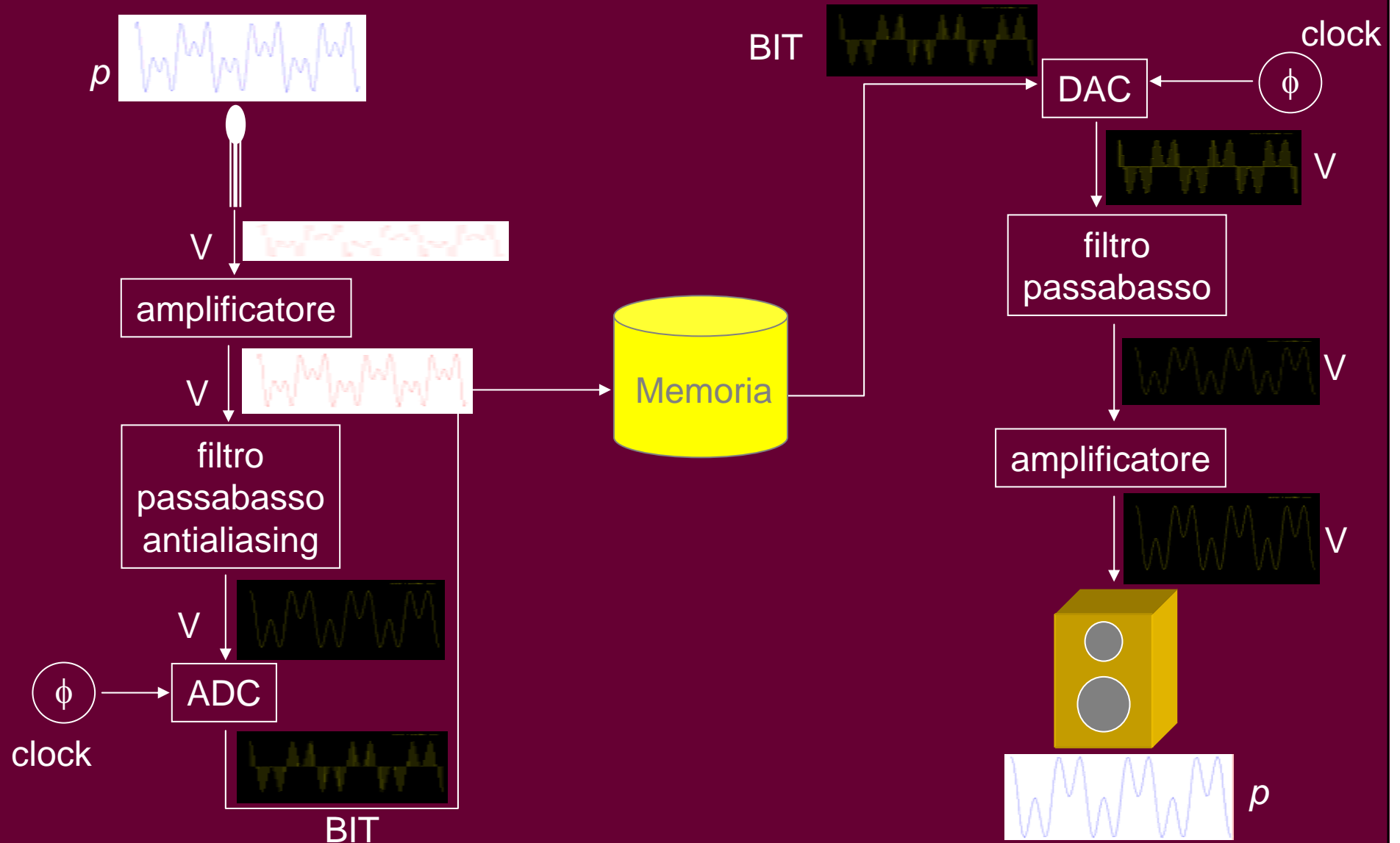


Di nuovo il filtro passabasso

- Il filtro “smussa” il segnale prodotto dal DAC per ottenere un segnale continuo
- Il segnale che arriva ai diffusori “suona” come l’originale

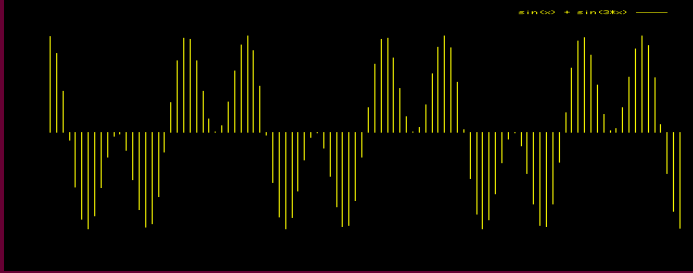


Riassumendo

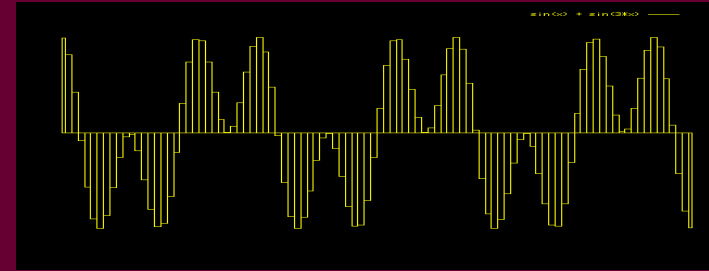


Appendice: la scheda audio

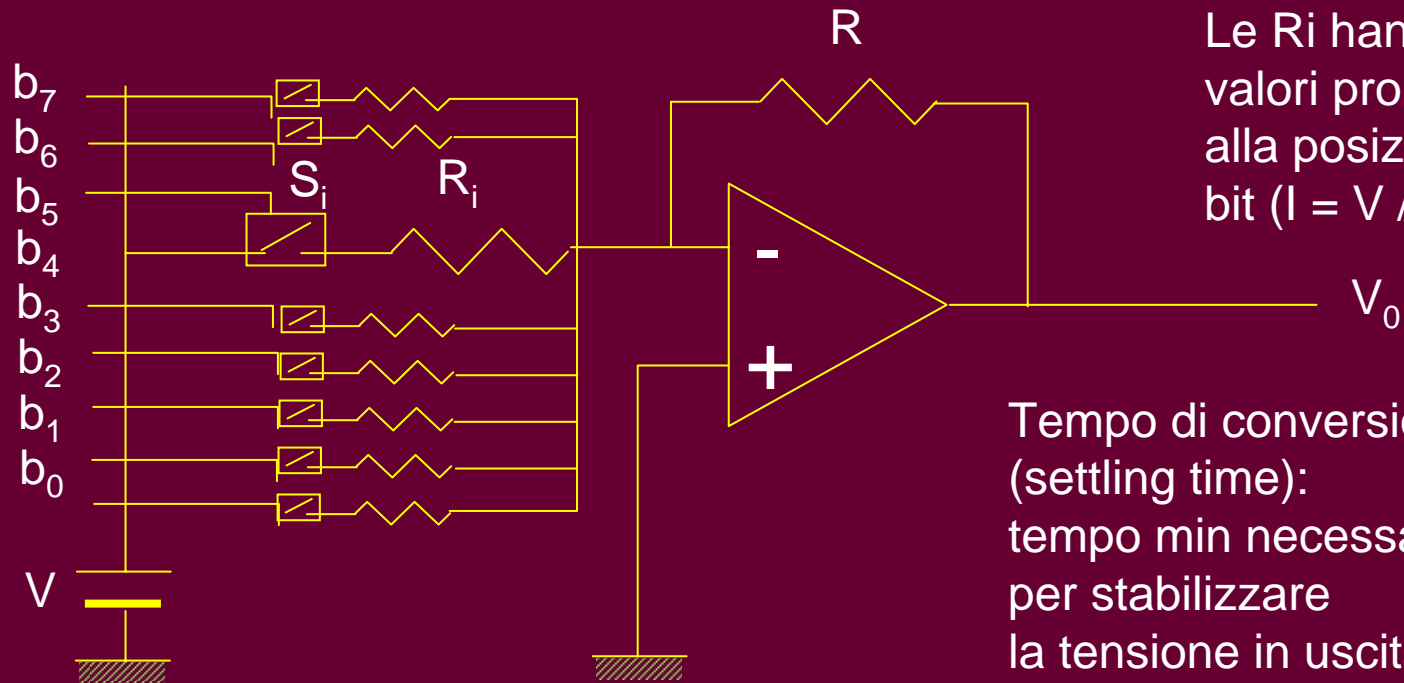
Il DAC e l'ADC

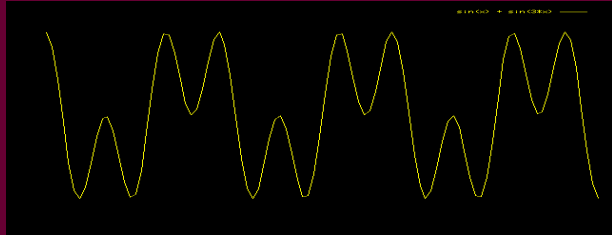


DAC

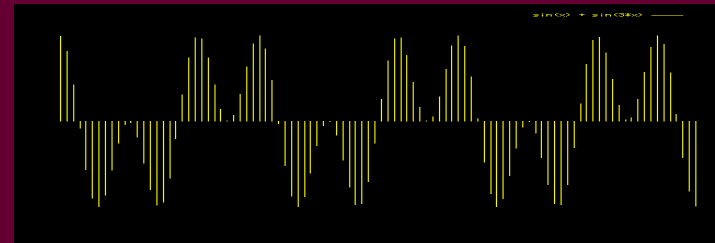


genera in uscita una tensione elettrica proporzionale al valore numerico in ingresso

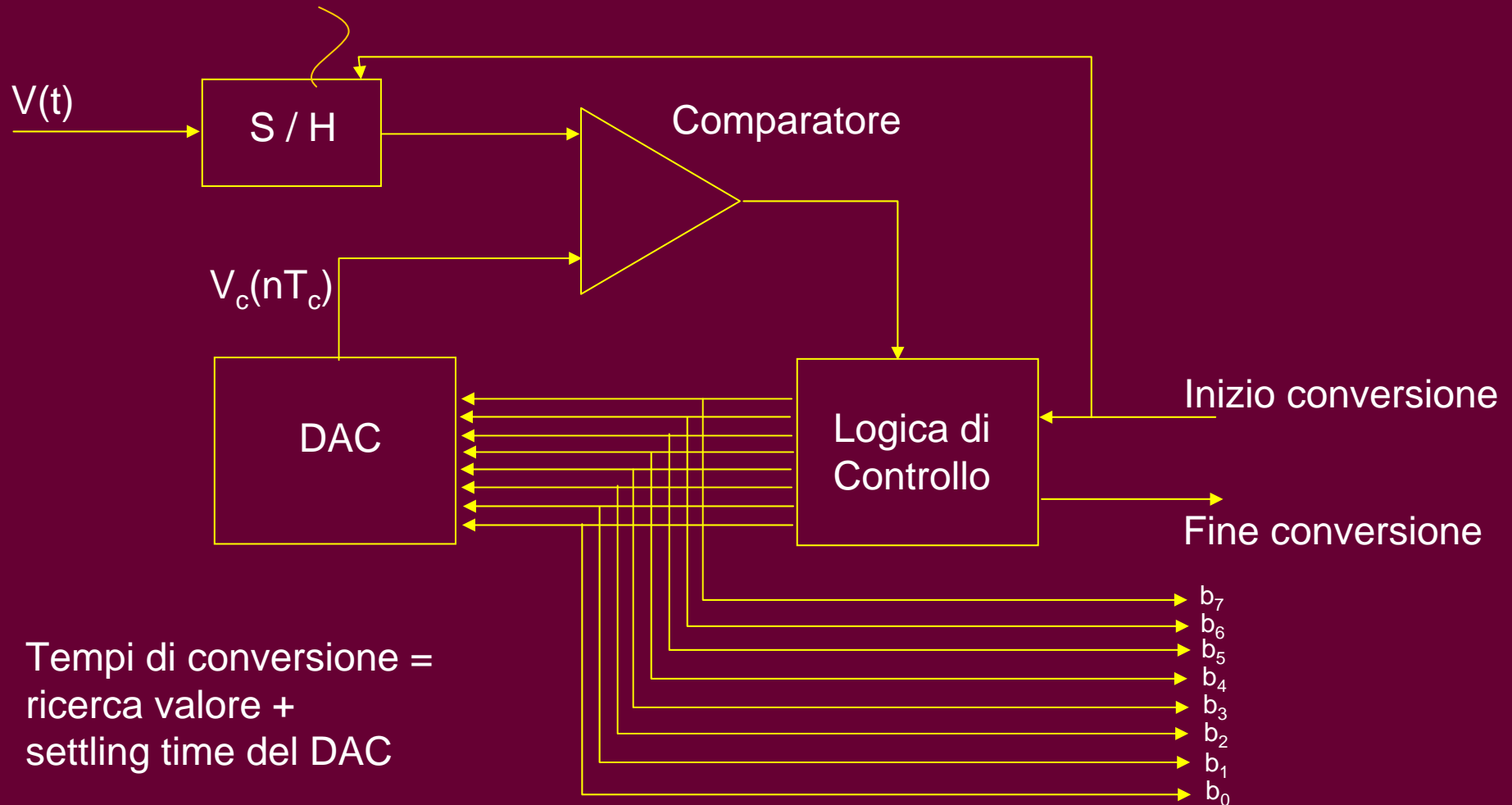




ADC



Circuito campionatore: Sample and Hold



Tempi di conversione =
ricerca valore +
settling time del DAC