

# Tecniche automatiche di acquisizione dati

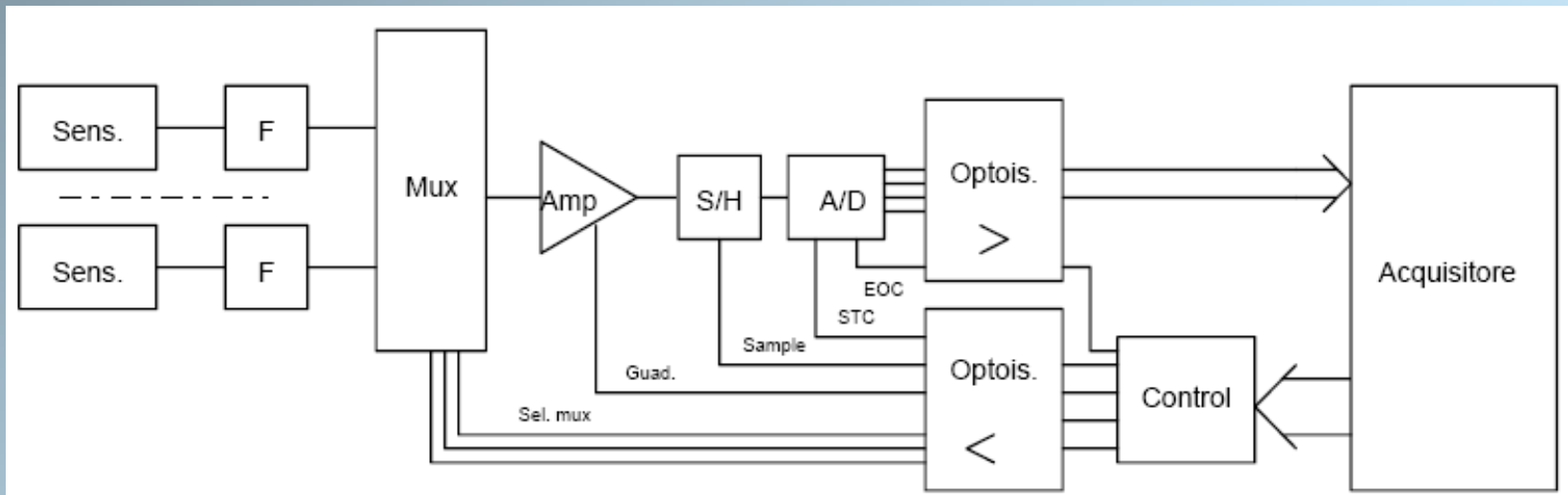
Digitalizzazione delle informazioni

# Acquisizione di segnali per l'elaborazione digitale

- Il segnale generato dai trasduttori in genere non è idoneo per la diretta elaborazione da parte dell'unità di governo che realizza un algoritmo di controllo
- Come visto nella lezione precedente c'è spesso bisogno di un'elettronica di condizionamento del segnale.
- Il segnale va poi filtrato in modo da permettere il campionamento corretto della grandezza da misurare (filtri anti aliasing)
- Spesso, per ragioni di economia, più segnali sono acquisiti dal medesimo canale ed è necessaria l'operazione di "multiplexing"
- Infine bisogna campionare i segnali e convertirli

# La catena di misura

- Per quanto detto, la catena di misura risulta dall'interconnessione dei seguenti dispositivi:
  - Sensore
  - Filtro
  - Multiplexer
  - Amplificatore
  - Sample and Hold
  - Convertitore analogico/digitale
  - Logica di controllo (hardware e/o software)
  - Acquisitore (computer)



# Errore di acquisizione ed elaborazione digitale del segnale

- il campionamento non introduce un degrado dell'informazione del segnale,
- la quantizzazione comporta un errore sul segnale acquisito
- Se  $\Delta Y$  è l'intervallo di uscita del trasduttore e lo rappresentiamo con un numero di  $N$  bit  $\Rightarrow$  l'errore massimo di quantizzazione è:

$$e_q = \text{LSB}/2$$

Essendo LSB il bit meno significativo:

$$\text{LSB} = \Delta Y / 2^N$$

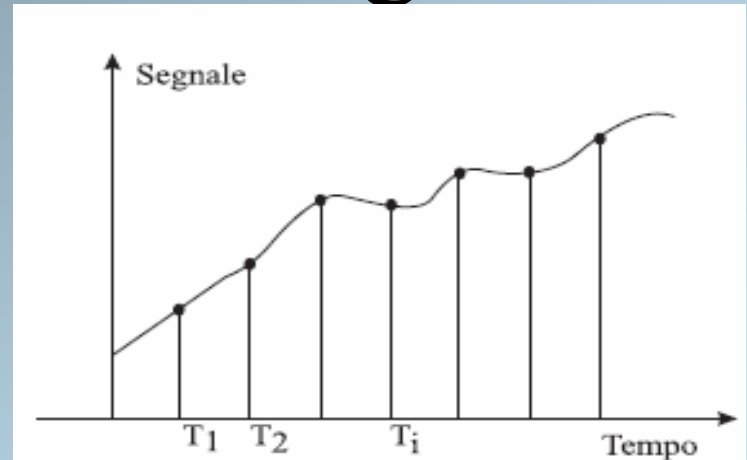
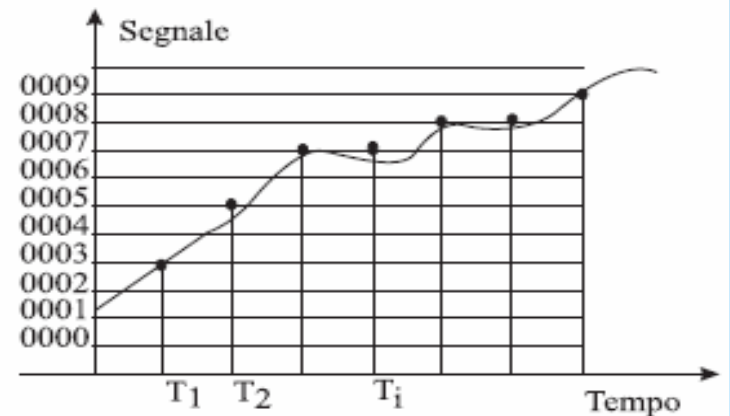
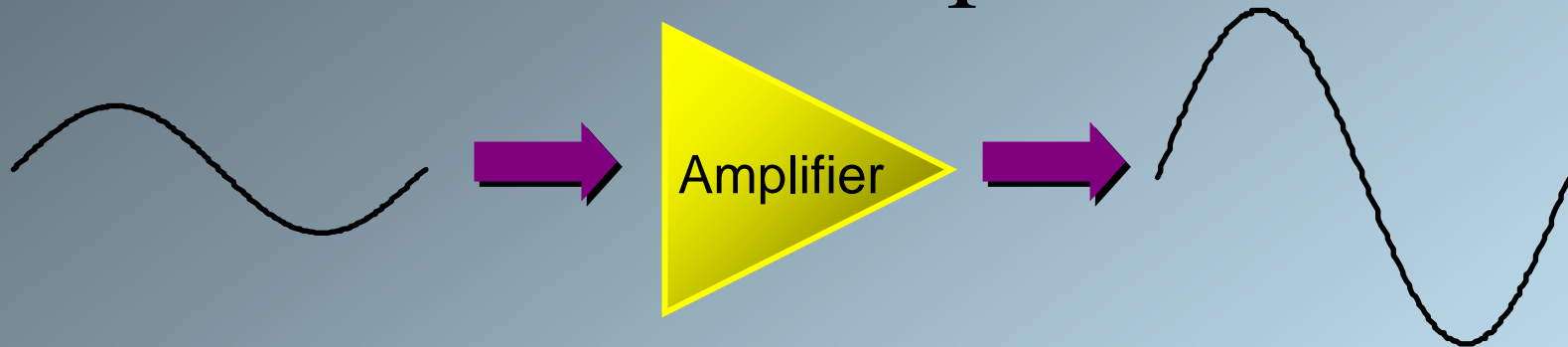


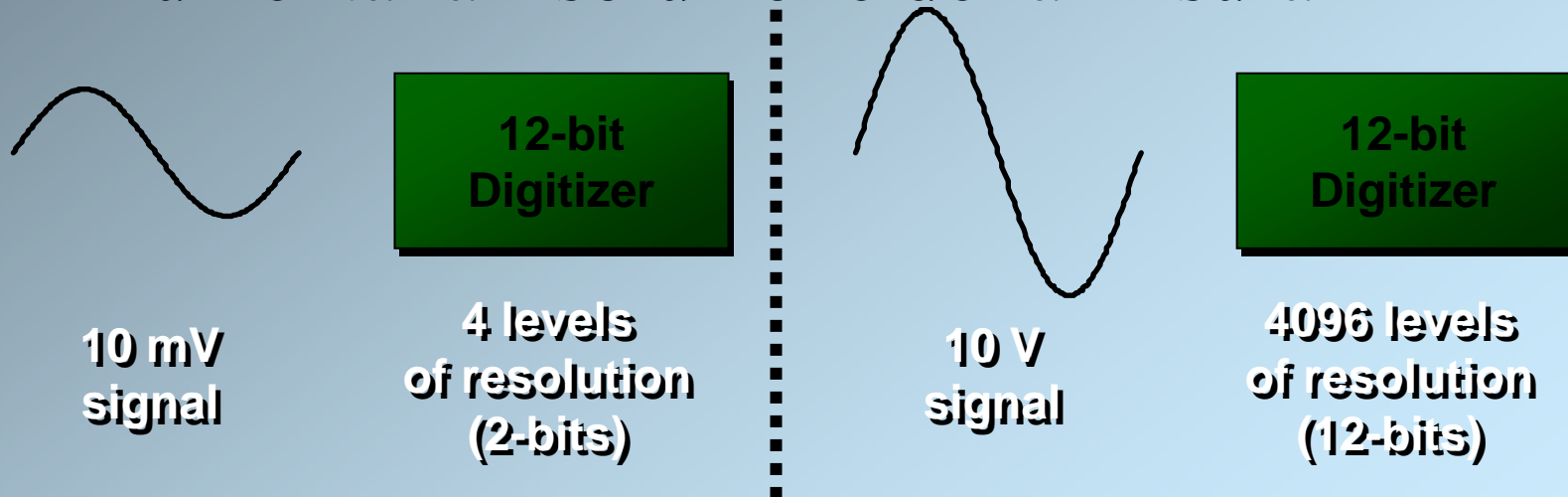
Figura 2.3: Segnale campionato



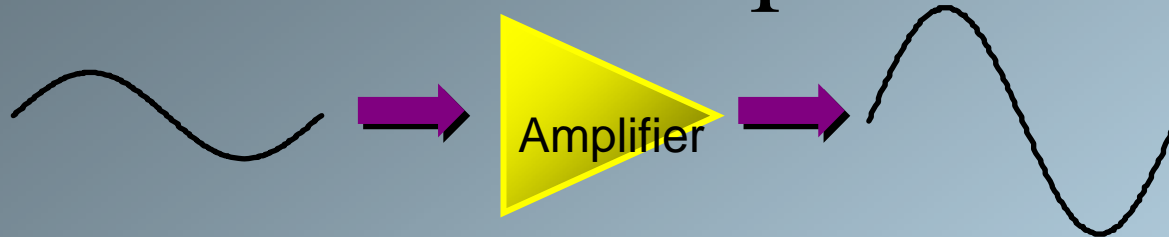
# Necessità dell'amplificazione



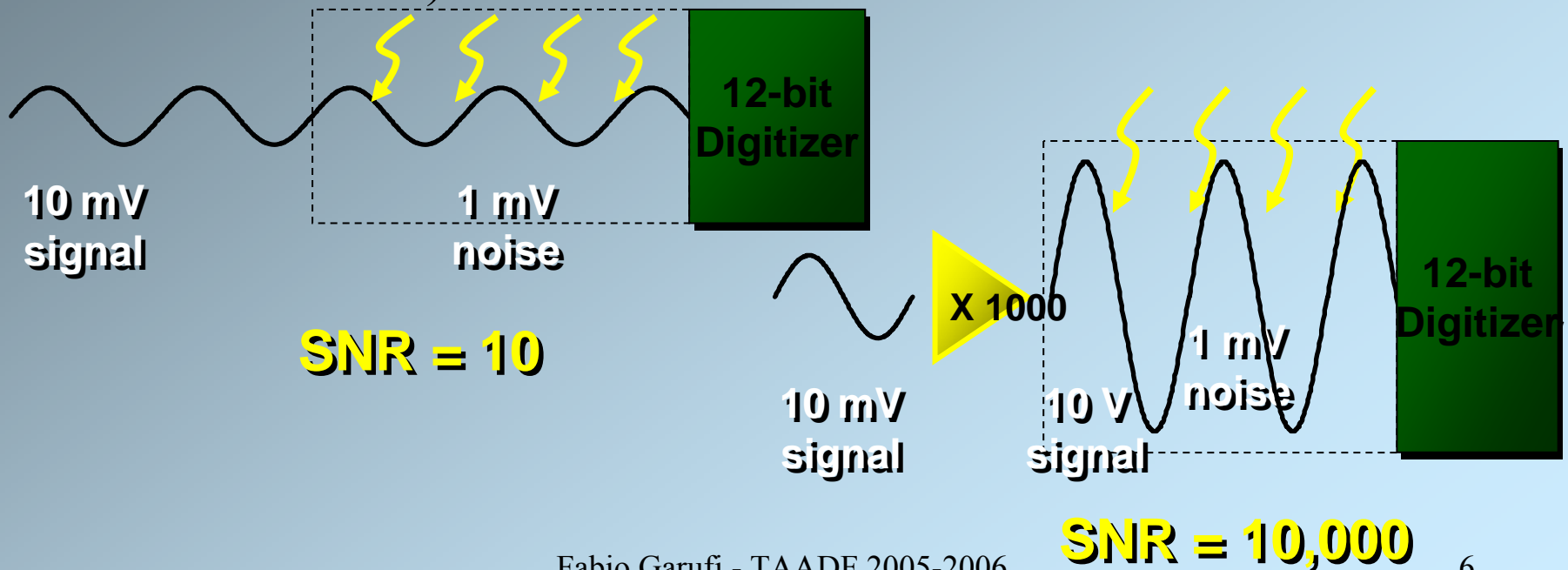
- Aumenta la risoluzione della misura



# Necessità dell'amplificazione II

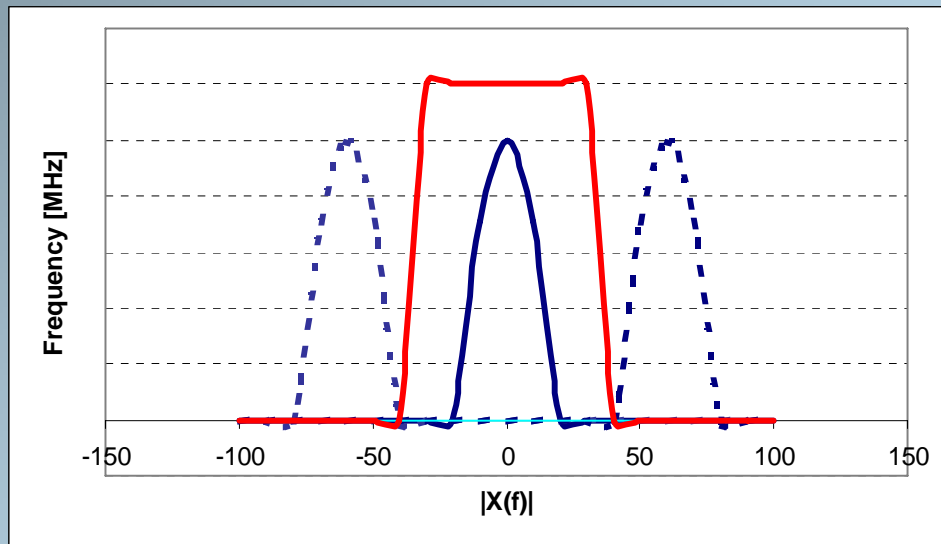


- Aumenta il rapporto segnale-rumore (Signal-to-Noise Ratio - SNR)

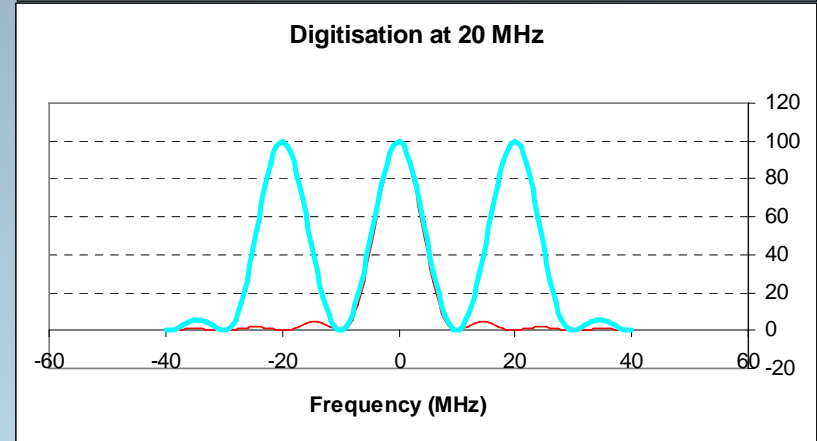
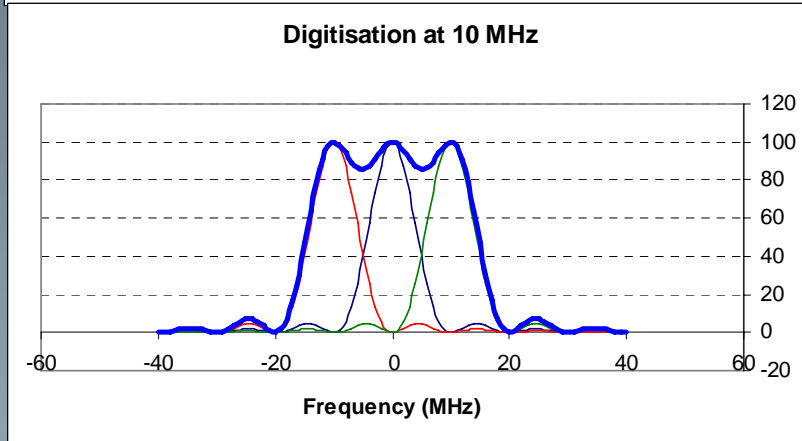
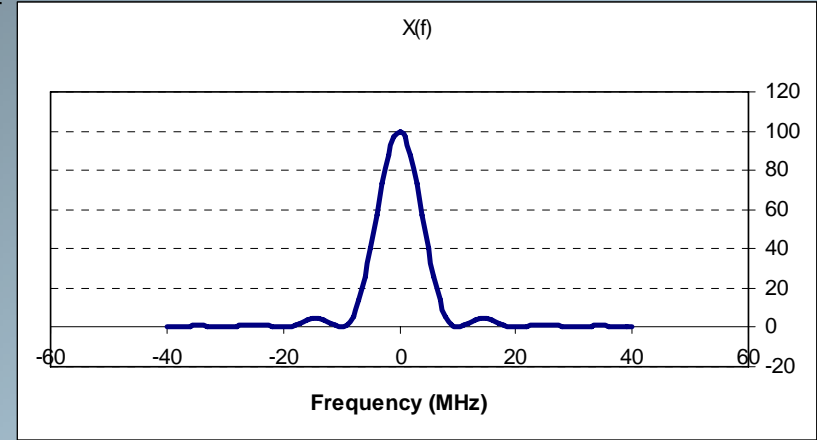
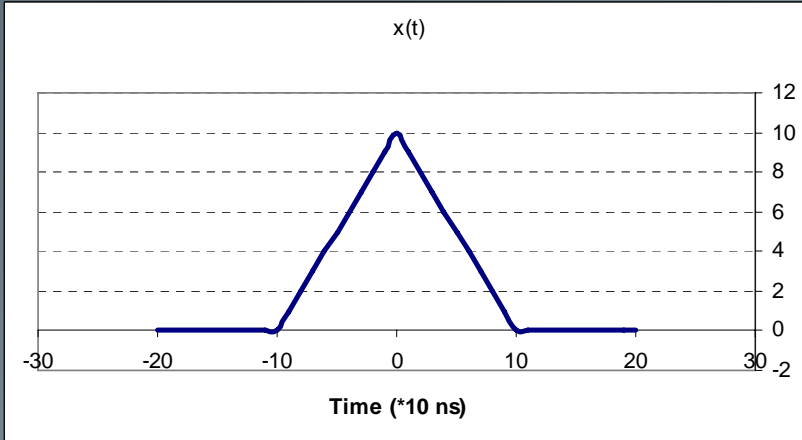


# Andamento spettrale di segnali campionati

- Un segnale ha una rappresentazione *spettrale*  $|X(f)|$ ;  $X(f) =$  trasformata di Fourier di  $x(t)$
- Un segnale  $x(t)$  digitalizzato alla frequenza  $f_s$  ha una rappresentazione spettrale uguale a quella di  $x(t)$  spostata ad ogni  $f_s$
- Se  $X(f)$  non è  $=0$  per  $f > f_s/2$ , c'è sovrapposizione degli spettri

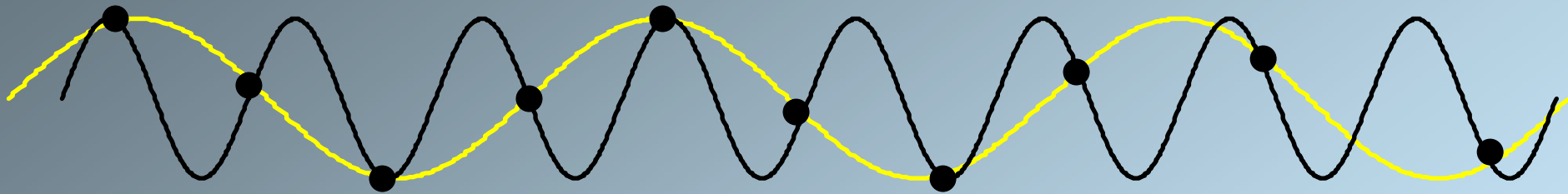


# Esempio



- Segnale: un impulso che sale in 10 ns e scende in 10 ns
- Effetto del campionamento a 10 e 20 MHz

# Aliasing



- Il sottocampionamento può far sì che segnali di alta frequenza appaiano come segnali di frequenza inferiore (aliasing).
- Una volta che il segnale ha subito aliasing non è più possibile recuperare il segnale originale.

## **Teorema di Nyquist o di Shannon**

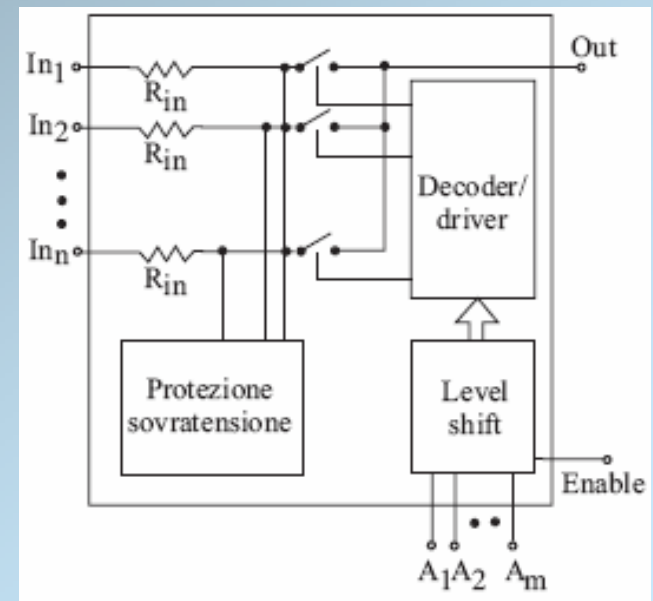
- Per evitare la sovrapposizione di componenti spettrali (aliasing di campionamento), la frequenza di campionamento deve essere  $f_s \geq 2f_{\max}$ , essendo  $f_{\max}$  la larghezza dello spettro del segnale originario.
- La frequenza  $2f_{\max}$  è detta frequenza di Nyquist

# Filtri anti aliasing

- Se ci sono componenti di rumore con frequenza maggiore di  $f_{\max}$  e il campionamento viene effettuato con frequenza prossima a quella di Nyquist, il rumore si sovrappone al segnale di interesse (Aliasing da disturbo): due soluzioni
  1. Filtro passa basso prima del campionamento (**anti-aliasing**)
  2. Aumento della frequenza di campionamento (sovracampionamento) e filtraggio digitale successivo.

# Multiplexer

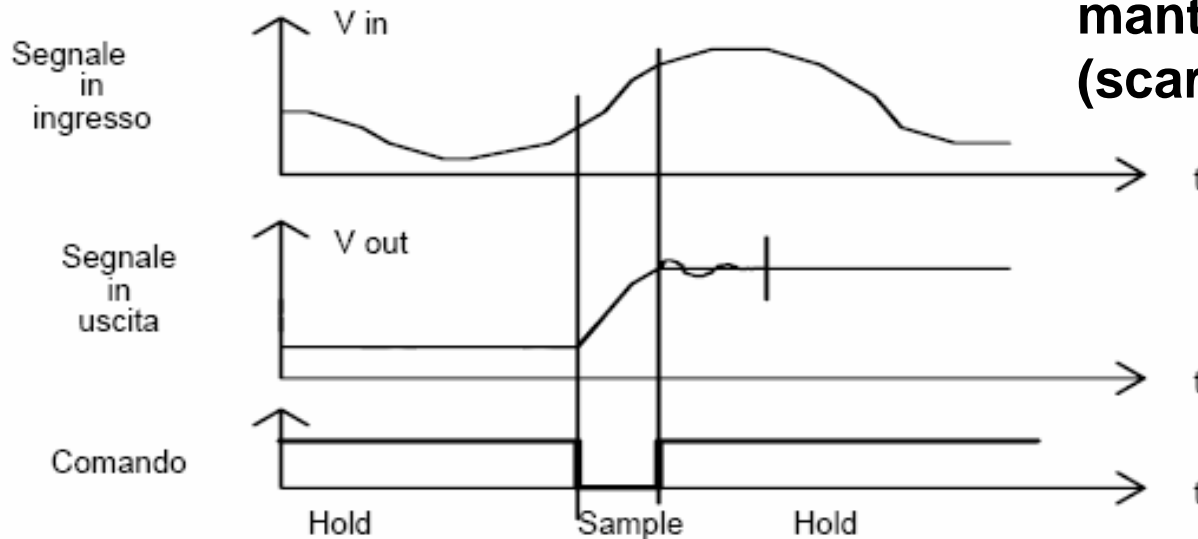
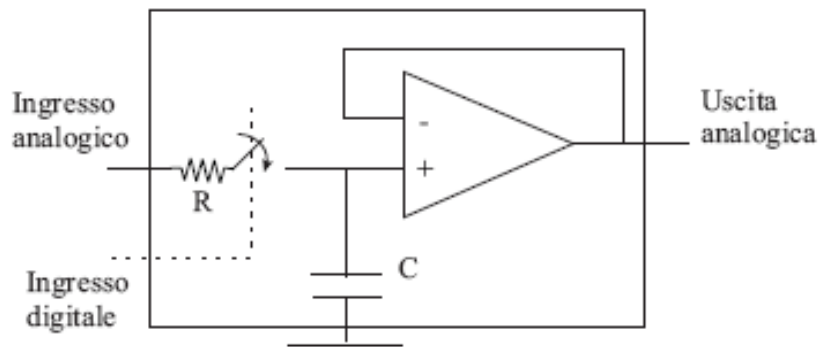
- È un dispositivo che commuta n canali in ingresso in uno in uscita
- La commutazione viene comandata da un segnale digitale che codifica il canale di ingresso da selezionare.
- Può essere a canale singolo o a canale differenziale



# Sample and hold

- I circuiti di campionamento e tenuta (sample and hold S/H) servono a mantenere fisso il valore del segnale campionato nel tempo in cui il convertitore A/D esegue la conversione
- È necessario quando la variazione del segnale durante il tempo di conversione è  $> \text{LSB}$
- Dal punto di vista logico, il S/H è caratterizzato da due fasi:
  1. La fase di sample (o anche track) riporta in uscita il segnale con guadagno unitario
  2. La fase di tenuta (hold) il valore del segnale ad un certo istante viene mantenuta costante.

# Samle and Hold II



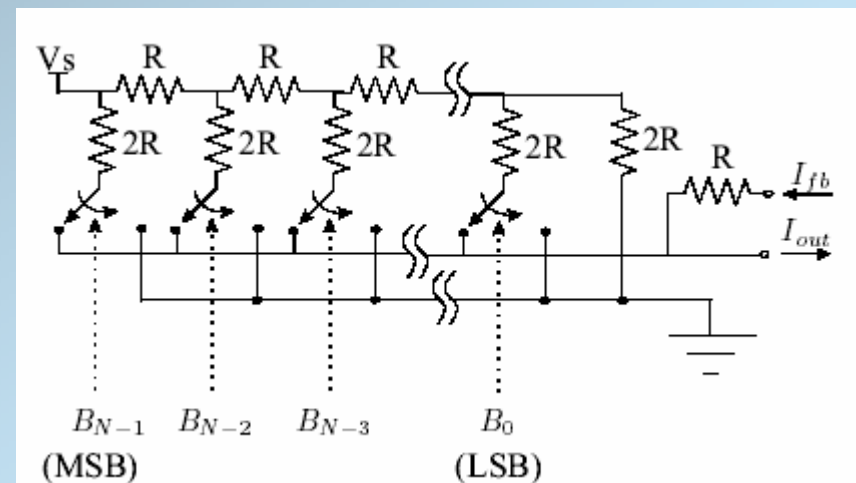
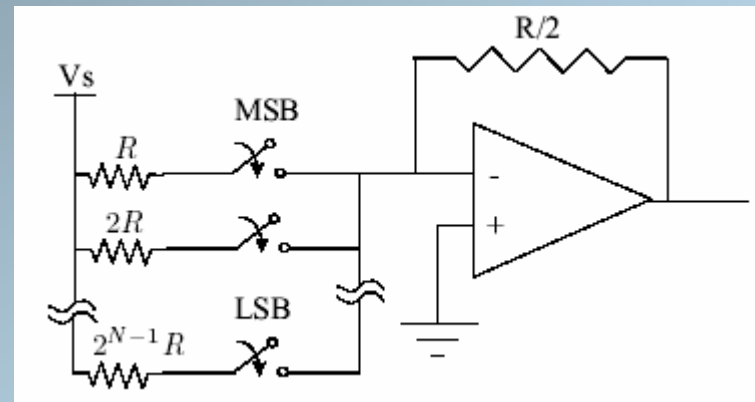
- Impedenza di ingresso (Alta)
- Rapidità di adattamento in fase sample (Slew-Rate)
- Tempo di assestamento (Settling) dopo il comando di hold
- Costante di tempo del mantenimento in hold (scarica esponenziale)

# Convertitori digitale Analogico (DAC)

- Converte una parola binaria in una grandezza elettrica analogica (tensione o corrente)
- Il fondo scala è il massimo valore binario rappresentabile  $2^N - 1$  ( $N$  = numero di bit)
- Se  $V_s$  è la massima tensione di uscita e  $x$  il numero da convertire  $\Rightarrow V_o = x V_s / 2^N$

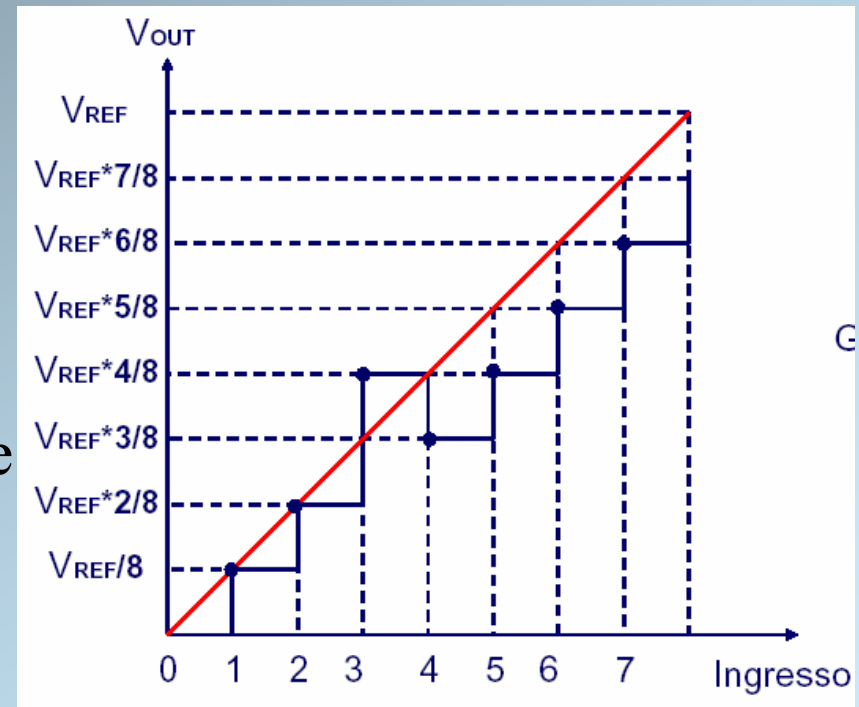
# Convertitori DAC II

- Dal punto di vista costruttivo è una rete resistiva:  $R, 2R, 4R \dots 2^{N-1}R$  unita ad un sommatore
- Difficilmente si trovano resistenze di valore esattamente pari ai multipli richiesti  $\Rightarrow$  si usa una rete composta da sole resistenze  $R$  e  $2R$
- La corrente nella prima resistenza a sinistra vale  $I_1 = V_s / 2R$ , quella nella seconda resistenza verticale vale  $I_2 = I_1 / 2 \dots I_N = I_1 / 2^{N-1}$ .
- $I_N$  è il bit meno significativo e  $I_1$  il MSB.



# Caratteristiche del DAC (e non solo)

- **Risoluzione:** Numero di bit in ingresso
- **Accuratezza relativa o Linearità:** deviazione dalla caratteristica ideale
- **Non linearità differenziale:** La caratteristica ideale prevede che l'uscita corrispondente a ciascun numero in ingresso differisca da quello adiacente di un LSB



# Caratteristiche del DAC II

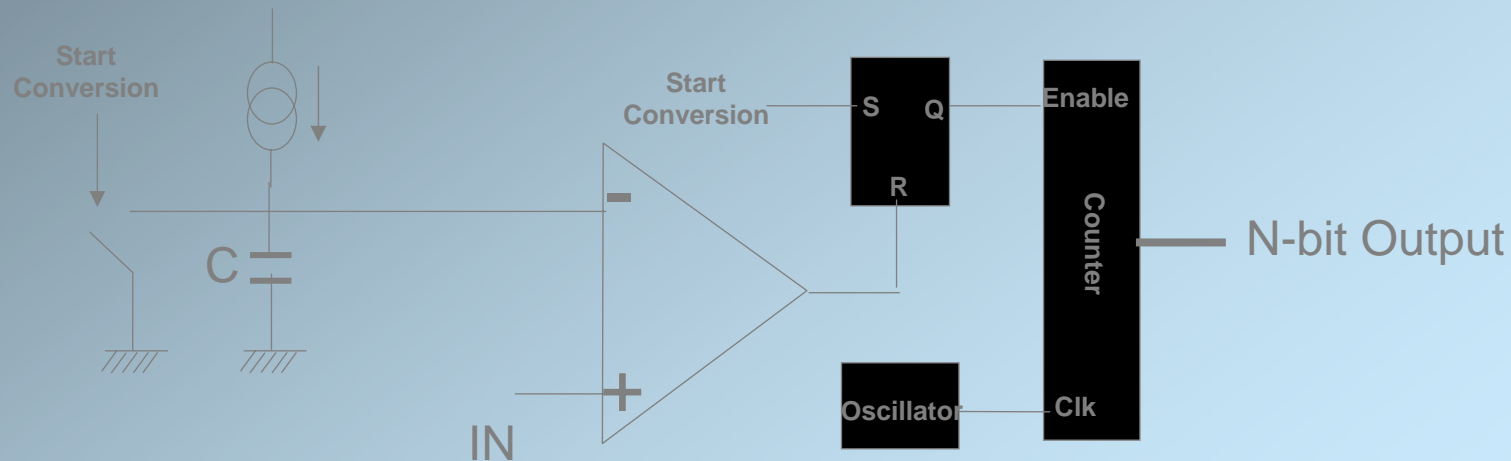
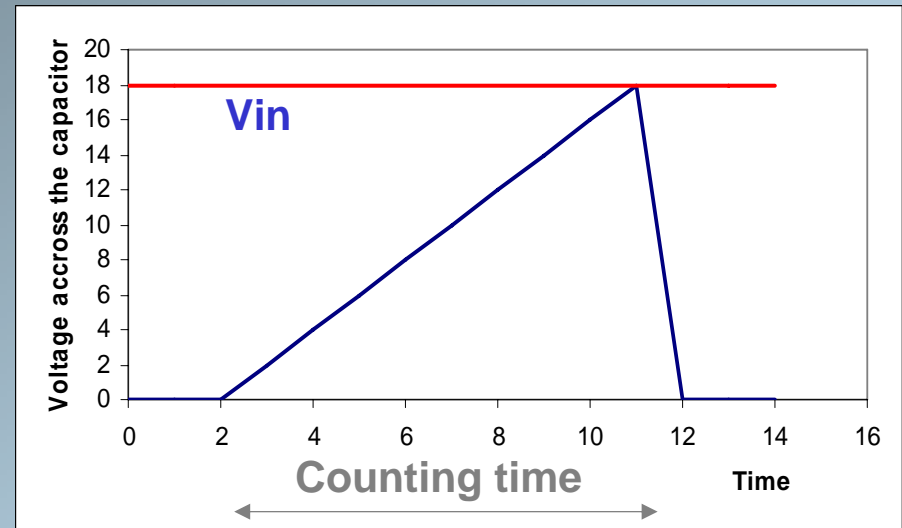
- **Errore di guadagno:** Differenza tra il valore di uscita reale e quello ideale
- **Corrente di leakage i uscita:** corrente misurata in uscita per ingresso nullo.
- **Settling time:** tempo impiegato alla corrente di uscita per stabilizzarsi al valore di regime entro  $\pm 0.5$  LSB dopo una variazione
- **DA glitch impulse:** Impulso generato dalla variazione di molti bit non tutti nello stesso momento (si misura in V/s)

# Convertitori Analogico Digitale (ADC)

- Convertono una grandezza elettrica in un numero binario proporzionale.
- Ad integrazione
  - A rampa
  - A doppia rampa
- In retroazione
  - Contatore
  - Approssimazioni successive
  - Sigma – Delta ( $\Sigma - \Delta$ )
- Conversione diretta o parallela
  - Flash ADC

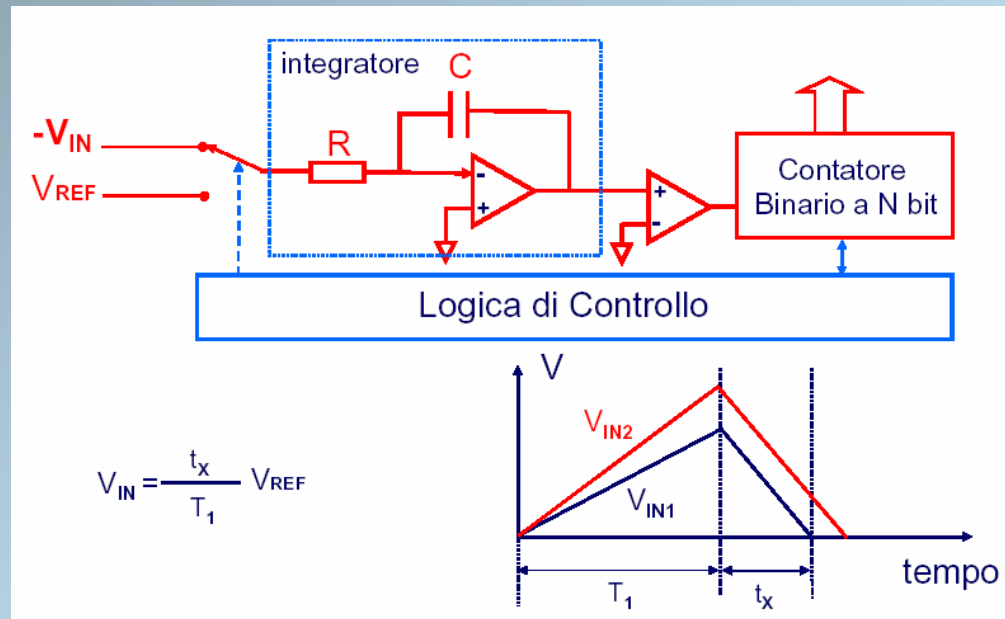
# ADC ad integrazione a rampa singola

- Comincia a caricare un condensatore con un a corrente costante.
- Conta i colpi di clock nel tempo di carica
- Ferma il conteggio quando la tensione sulla capacità raggiunge l'input
- Non può arrivare a grandi risoluzioni
  - Capacità
  - Comparatore



# ADC ad integrazione a doppia rampa

- Misura rapporti tra tempi di carica e scarica di un condensatore
- La capacità è caricata con una corrente proporzionale a  $V_{in}$  in un tempo fissato
- Conta i clock nel tempo di scarica
- Precisione data dal rapporto di parametri
- Integranti
- Lenti (50 – 200 ms)
- Alta risoluzione (14 – 16 bit)
- Economici



# ADC ad approssimazioni successive

## METODO

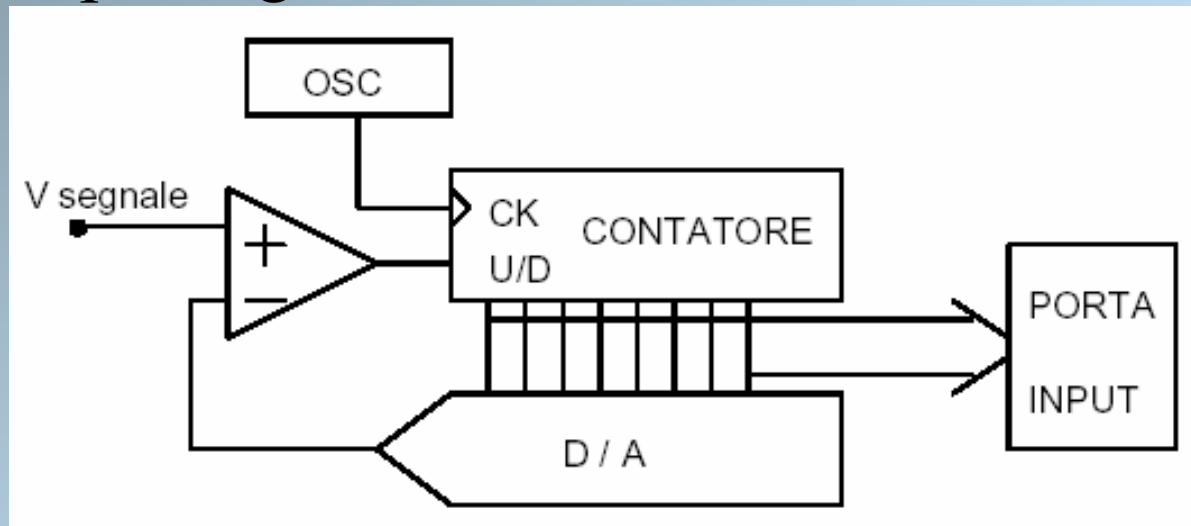
- Si sceglie un valore digitale a metà del campo di valori
- Si converte in un segnale analogico
- Si confronta il segnale analogico con l'ingresso
- In base al confronto si cambia il valore di prova

## CARATTERISTICHE

- Costo relativamente basso
- Buona velocità 1 – 50  $\mu\text{s}$
- Risoluzione 8 – 16 bit
- Non integra (richiede S/H)
- Rischi di non linearità differenziale e non monotonicità

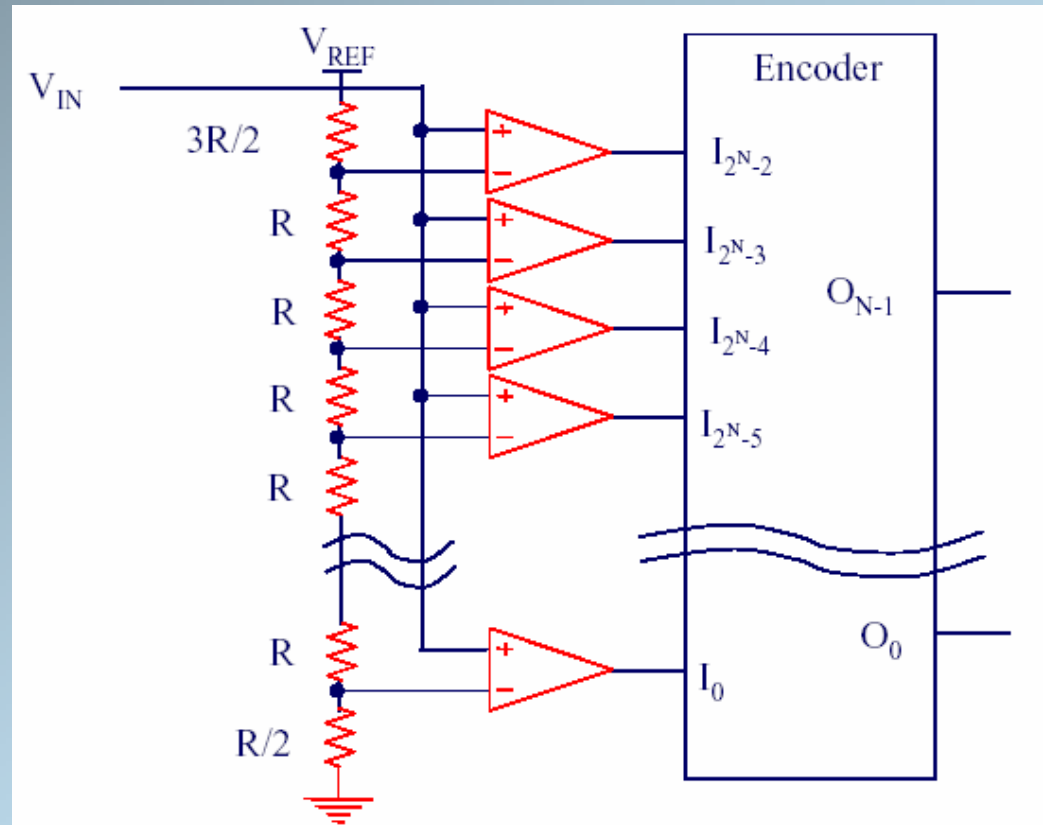
# ADC a Contatore (Tracking)

- Il valore di prova viene aggiornato continuamente con incrementi o decrementi
- Il valore del contatore può essere letto in ogni momento
- Adatto per segnali lenti



# Flash ADC

- Si fa il confronto con  $2^N$  comparatori ed altrettanti riferimenti
- Molto veloci: 100 – 500 ns
- Bassa risoluzione 4 – 10 bit
- Costo elevato: 1 comparatore per ciascun bit!!!



# Numero di bit effettivi

- Un ADC an n bit introduce un errore di quantizzazione:

$$\varepsilon = \frac{q}{\sqrt{12}}$$

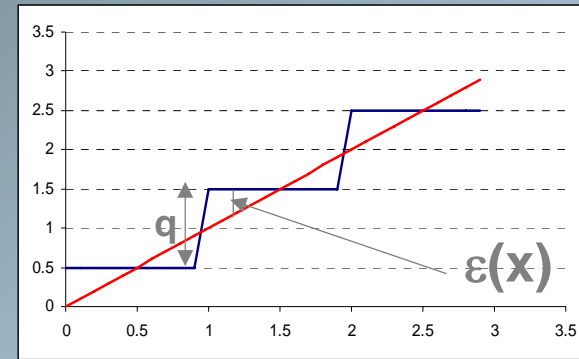
- La conversione di un segnale  $(A/2) \sin \omega t$  essendo A il fondoscala darà un errore:

$$\overline{\varepsilon^2} = \frac{q^2}{12} = \frac{A^2}{12^{2n}}$$

- Signal to Noise Ratio

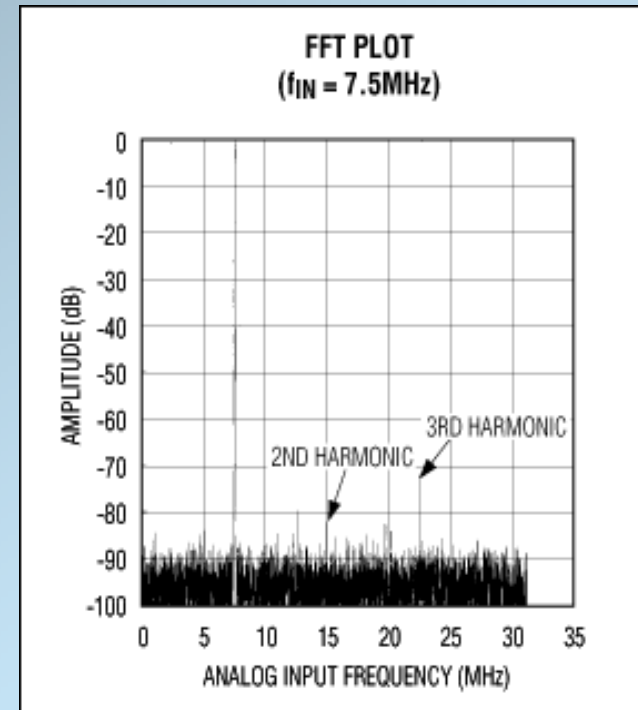
$$\text{SNR} = 10 \log \left( \frac{\overline{x^2}}{\overline{\varepsilon^2}} \right) = 10 \log \left( \frac{\frac{A^2}{8}}{\frac{A^2}{12^{2n}}} \right) = 6n + 1.8 \text{ dB}$$

- Numero effettivo di bit di un FADC a n-bit
  - n' che da il corretto SNR
- Esempio: 12-bit da 20 a 65 MHz
  - Fissiamo SNR = 70 dB
  - Effective number of bits =  $(70 - 1.8) / 6 = 11.4$

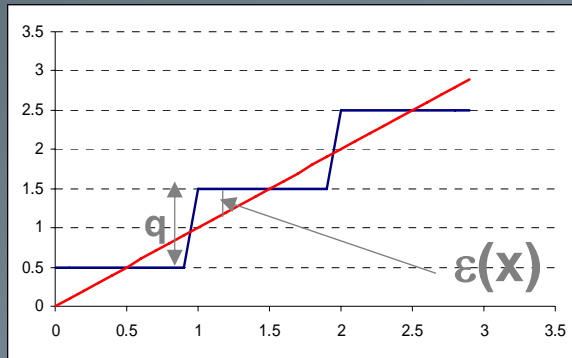


$$-\frac{q}{2} \leq \varepsilon \leq +\frac{q}{2}$$

$$\overline{\varepsilon^2} = \frac{1}{q} \int_{-\frac{q}{2}}^{+\frac{q}{2}} x^2 dx$$

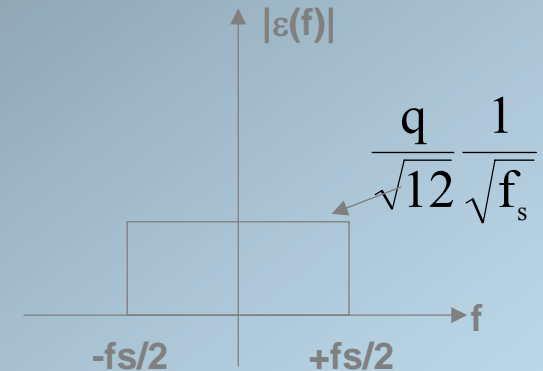


# Over-sampling ADC



$$-\frac{q}{2} \leq \varepsilon \leq +\frac{q}{2}$$

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{q} \int_{-\frac{q}{2}}^{+\frac{q}{2}} x^2 dx = \frac{q^2}{12}$$



- Assumendo che l'errore  $\varepsilon$  sia rumore bianco, la sua PSD è piatta nell'intervallo  $[-f_s/2, f_s/2]$
- Se  $f_s$  è maggiore della frequenza  $f_0$  del segnale da misurare, allora, dopo il filtraggio l'errore sarà diventato:

$$\varepsilon \sqrt{\frac{f_0}{f_s}} = \frac{A}{2^n} \frac{1}{\sqrt{12}} \sqrt{\frac{f_0}{f_s}} \quad \text{with } A \text{ being the full scale and } n \text{ the number of bits}$$

# Over-sampling ADC (cont)

- Il Rapporto Segnale-Rumore quando si converte un segnale  $(A/2) \sin \omega t$ , essendo  $A$  la scala, sarà

$$SNR = 10 \log \left( \frac{\overline{x^2}}{\varepsilon^2} \right) = 10 \log \left( \frac{\frac{A^2}{8}}{\frac{A^2}{12} \frac{f_0}{2^{2n} f_s}} \right) = 1.8 + 6n + 10 \log \left( \frac{f_s}{f_0} \right) \text{ dB}$$

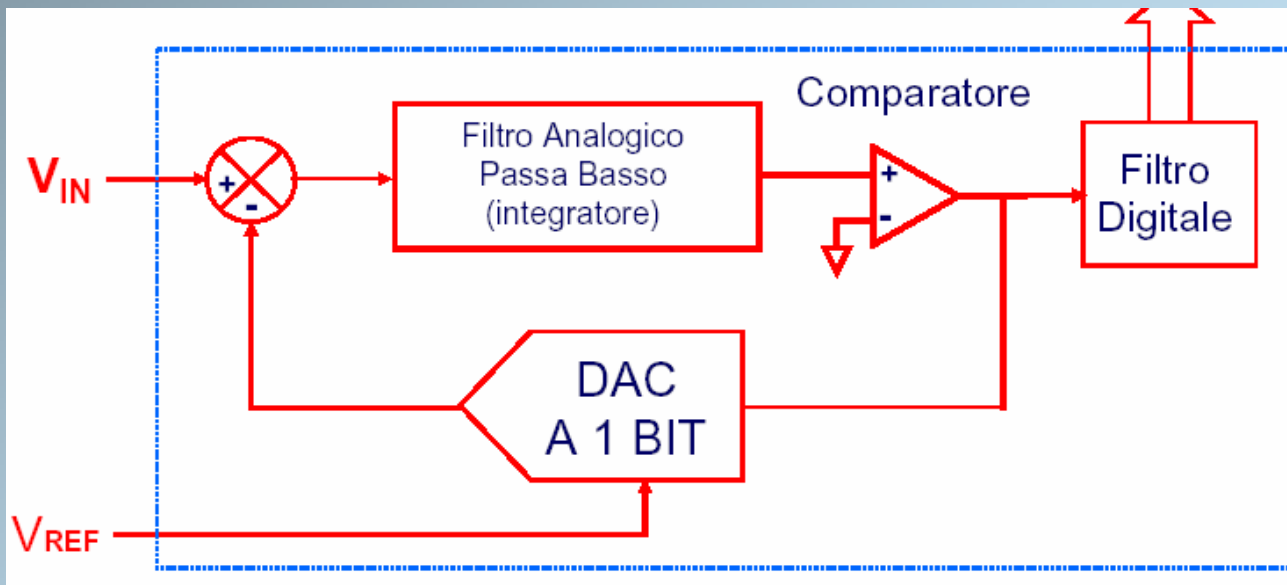
$$SNR = 1.8 + 6n'$$

*n'* being the effective number of bits

- Quindi è possibile aumentare la risoluzione aumentando la frequenza di campionamento e filtrando.
- Esempio :
  - Un ADC a 8-bit diventa a 9-bit ADC con un fattore di sovracampionamento di 4
  - Ma l'ADC a 8-bit deve soddisfare I requisiti di linearità di un ADC a 9-bit

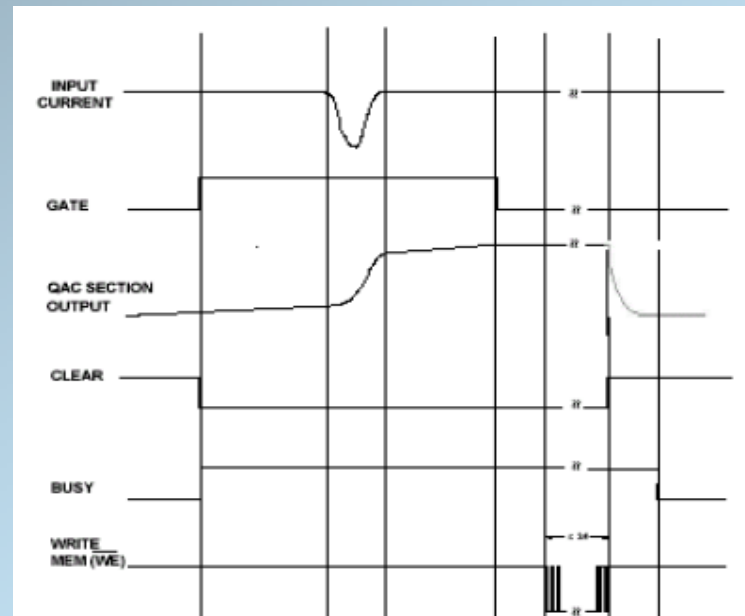
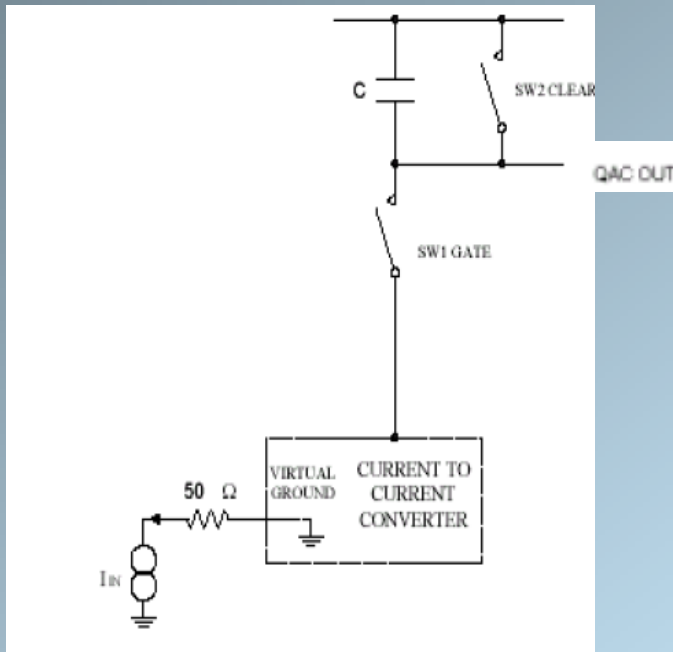
# ADC $\Sigma - \Delta$

- Sovracampionamento e filtraggio digitale passa basso
- Si può generalizzare con un ADC ad approssimazioni successive con DAC ad 1 bit



# Charge to Digital Converter - QDC

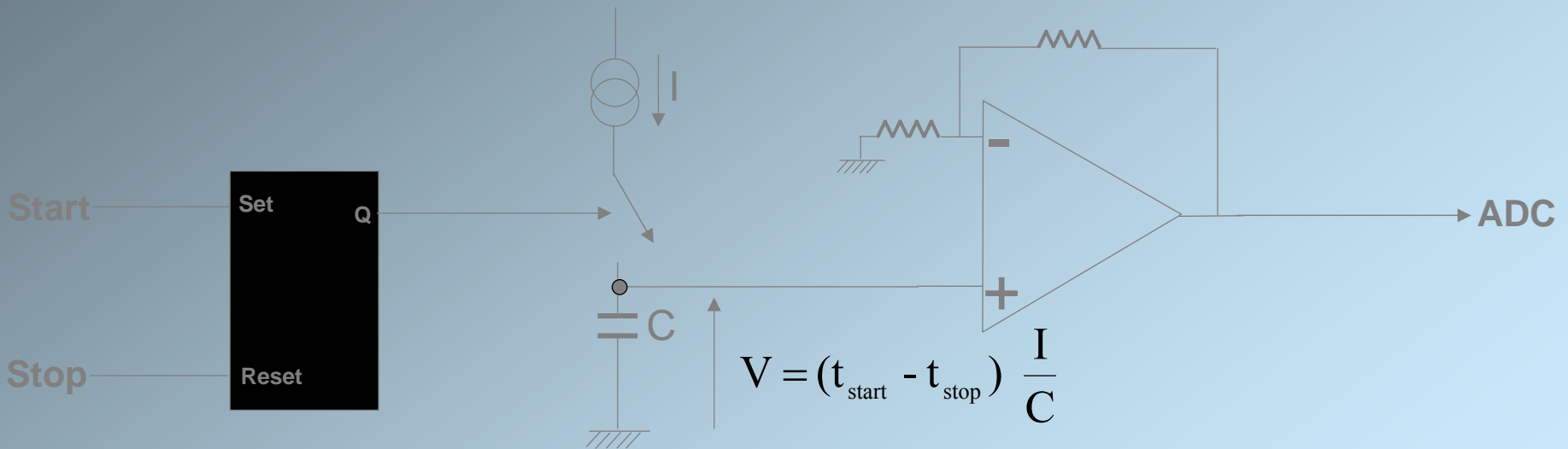
- Misura la carica (l'integrale della corrente nel tempo) di un segnale che cada all'interno di un segnale detto di gate.
- È composto da un convertitore carica-ampiezza (QAC – essenzialmente un circuito RC) e da un ADC.



# Time to Digital Converter

- È essenzialmente costituito da un clock ed un contatore.
- Il contatore è abilitato a partire da un impulso di start e fino ad un impulso di stop.
- La risoluzione temporale è data dal fondoscala cioè dalla massima differenza tra start e stop, che spesso è regolabile:  $r=f/2^N$ .

# Esempio TDC



# Discriminatori

- Da un segnale impulsivo dobbiamo ricavare un istante di start o di stop.
- Input = Segnale analogico
- Output = segnale digitale
  - Dopo un ritardo fisso, se possibile
  - Se il segnale passa una soglia
- discriminatore  $\approx$  amplificatore ad alto guadagno

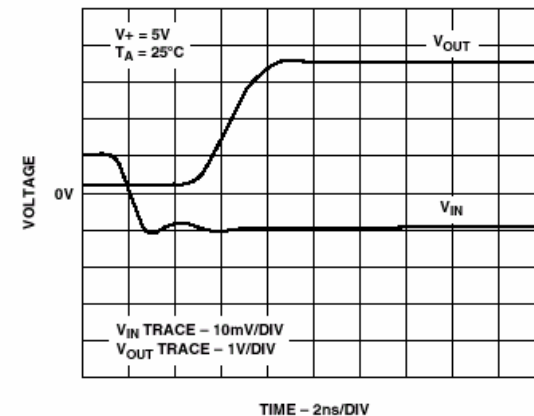
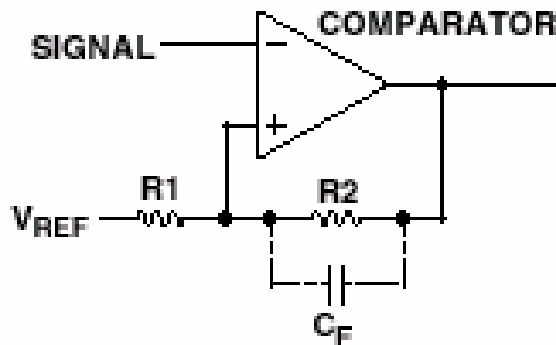
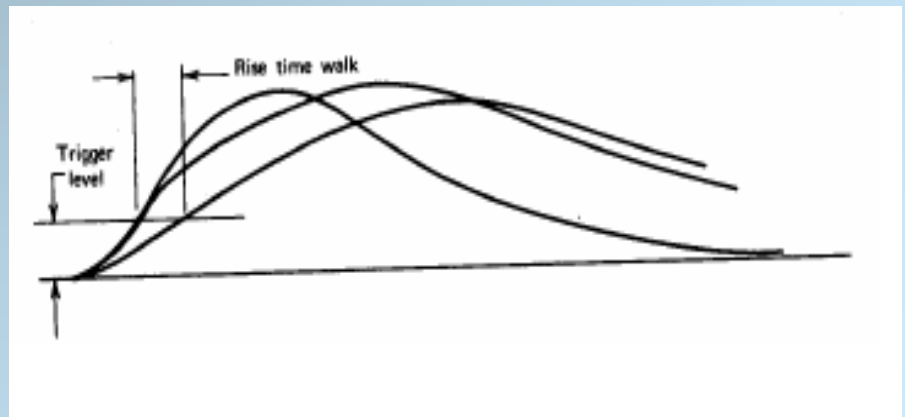
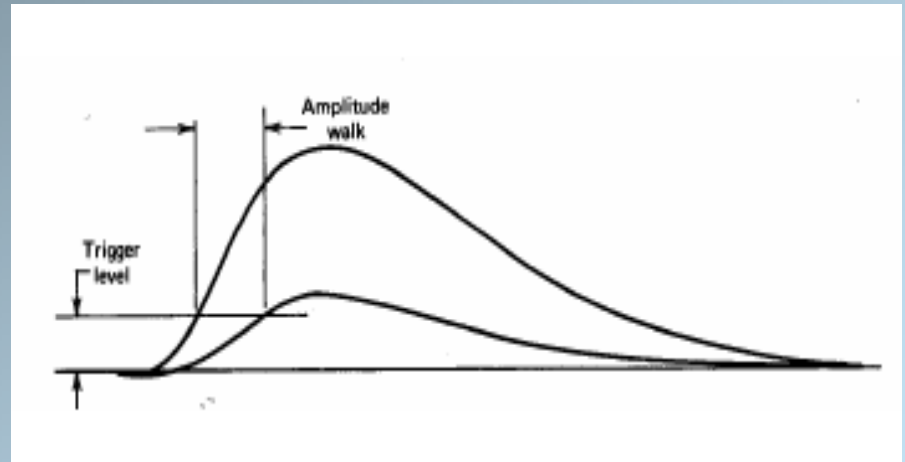


Figure 15. Rising Edge Response

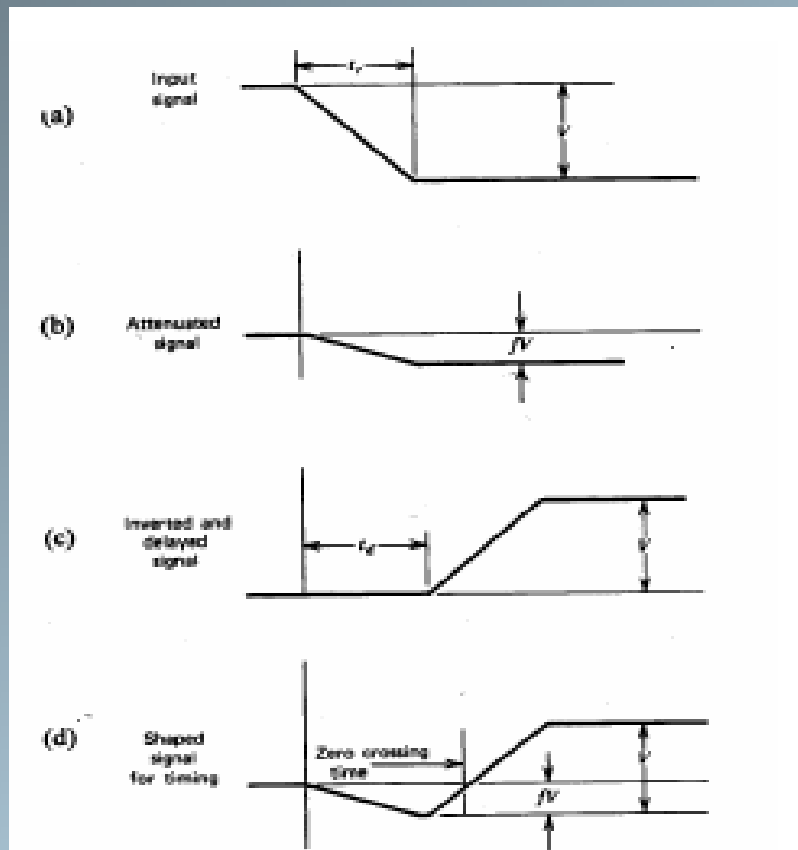
# Time Walk

- Differenza di tempo dovuta al passaggio della soglia. Può dipendere
  - Dall'ampiezza
  - Dal tempo di salita.



# Constant Fraction Discriminator (CFD)

- Serve a risolvere il problema del time walk
- Produce un segnale logico dopo che il fronte di salita ha raggiunto una percentuale costante del picco.



1. Si prende il segnale e lo si moltiplica per una frazione  $f$
2. Si inverte il segnale di ingresso e lo si ritarda di più del tempo di salita
3. Si sommano i due segnali di 1. e 2.
4. Il segnale in uscita parte quando la somma passa lo zero, che corrisponde a quando il segnale raggiunge una frazione  $f$  del picco e, a parità di forma è indipendente dall'ampiezza.