

CAMPIONAMENTO

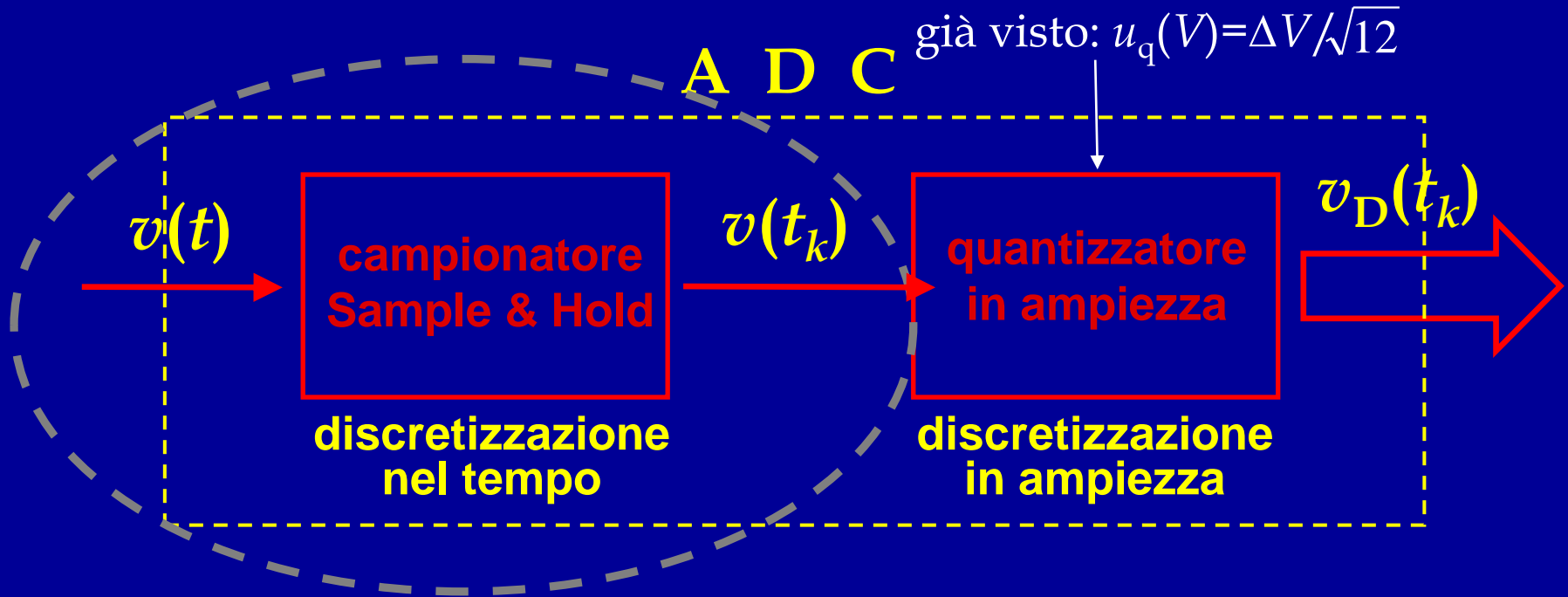
SCHEDA DAQ

PROTOCOLLI



prof. Cesare Svelto

Campionamento ideale/reale



Il segnale campionato $v(t_k) = v(kT_c) = x_c(t)$ **idealmente** si ottiene prelevando i campioni in un **tempo infinitesimo** ma nella **realtà** occorre un **tempo finito** ($T_{window} = T_w \neq 0$) per prelevare da $v(t)$ il segnale campionato $v(t_k)$ e poi per quantizzarlo

Segnale di ingresso e campionamento

Un **segnale** di tensione $v(t)=x(t)$ è **reale e continuo**

Ipotizziamo di lavorare con uno **spettro** del segnale "**limitato**": trasformata $X(f)$ t.c. **$X(f)\equiv 0$ per $|f| > f_{\max}$**

(se il segnale non ha banda limitata a f_{\max} si può usare un filtro passa-basso)

In un **campionamento ideale** il segnale è moltiplicato per un treno (serie) di **delta di Dirac** **$h(t)=\delta(t)$**

In un **campionamento reale** il segnale è moltiplicato per un treno (serie) di **rettangoli** **$h(t)=\text{rect}(t/T_w)$** in cui il singolo rettangolo ha durata finita T_w

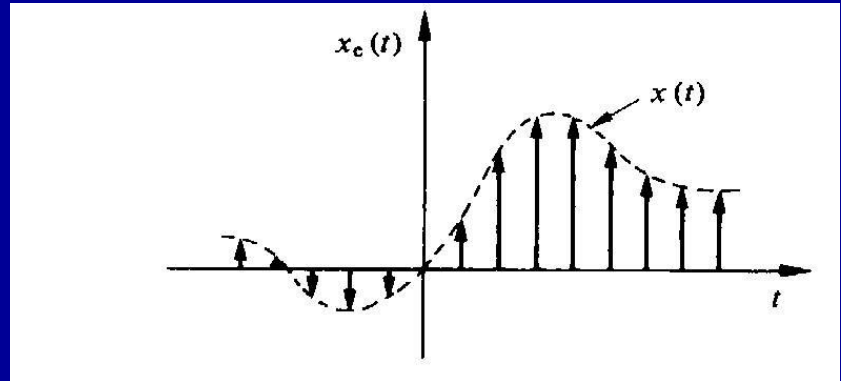
Delta di Dirac e rettangoli sono centrati negli "**istanti**" di campionamento (**kT_c**)

Campionamento ideale

T_c e f_c sono periodo e frequenza di campionamento

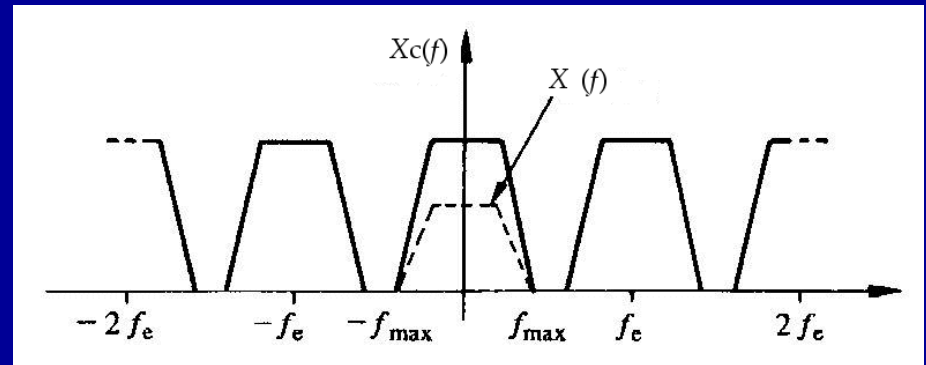
segnale campionato
(dominio temporale)

$$x_c(t) = x(t) \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(t - kT_c)$$



segnale campionato
(dominio spettrale)

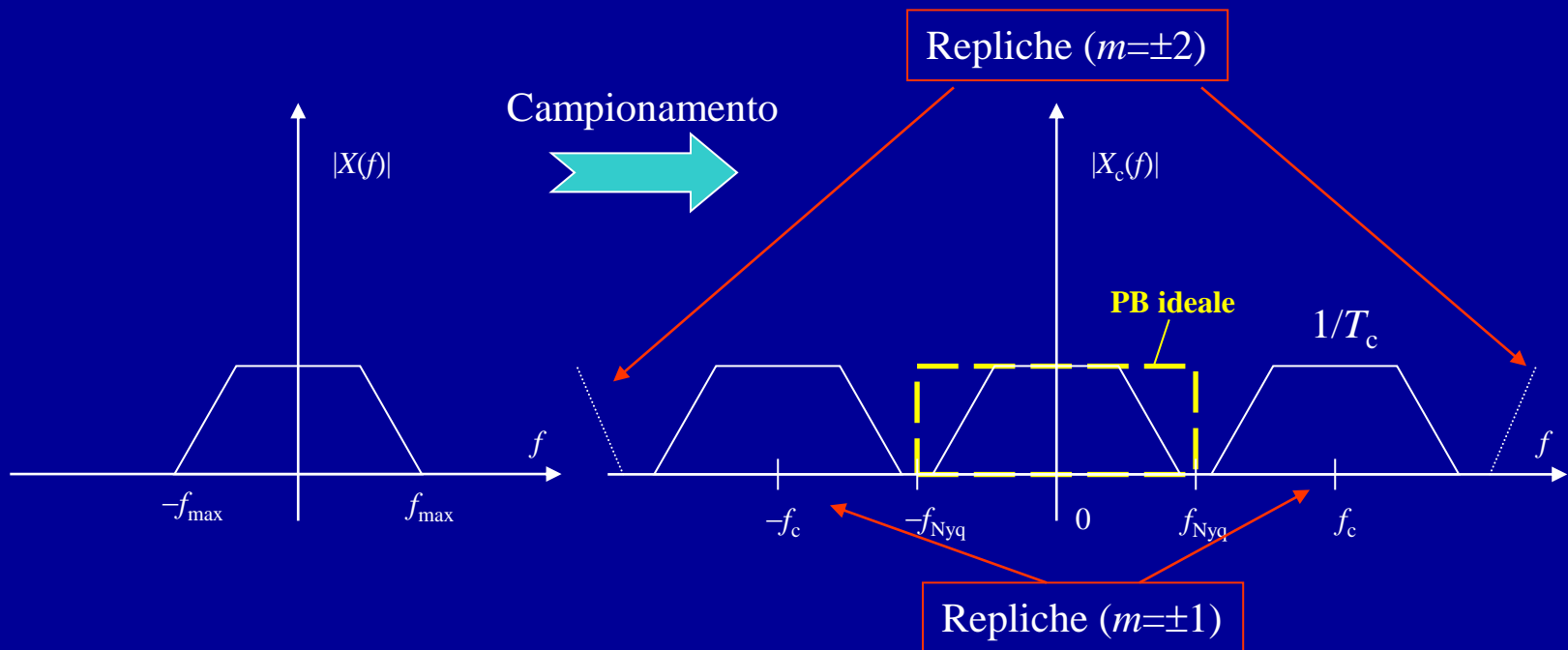
$$X_c(f) = f_c \sum_{m=-\infty}^{+\infty} X(f - mf_c)$$



Lo spettro del segnale campionato è periodico
e contiene infinite **repliche ("alias")** dello spettro
del segnale, distanziate **con un passo f_c**

Teorema di Shannon

Un filtro **passa-basso (PB) ideale** con frequenza di taglio pari alla **frequenza di Nyquist** $f_{\text{Nyq}} = f_c/2$ permette di **ricostruire** il segnale originale, dal segnale campionato, se la **massima frequenza** f_{max} del segnale d'ingresso è tale che $f_{\text{max}} \leq f_{\text{Nyq}}$



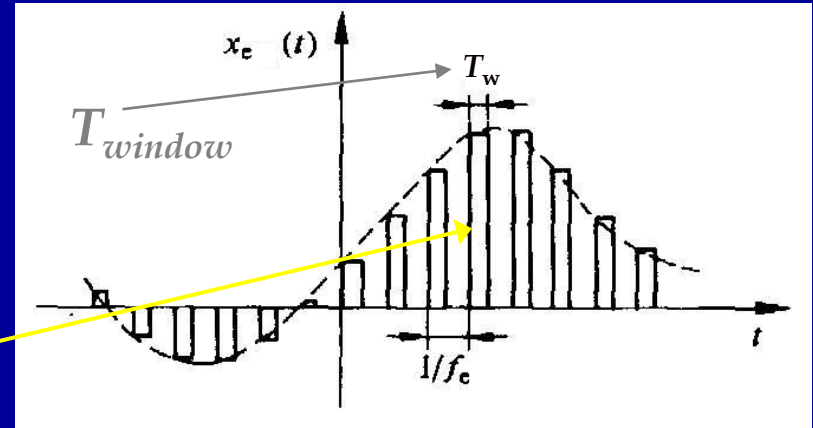
Se $f_{\text{max}} > f_{\text{Nyq}}$ si avrà **aliasing** (equivocazione) sul segnale ricostruito

Campionamento reale

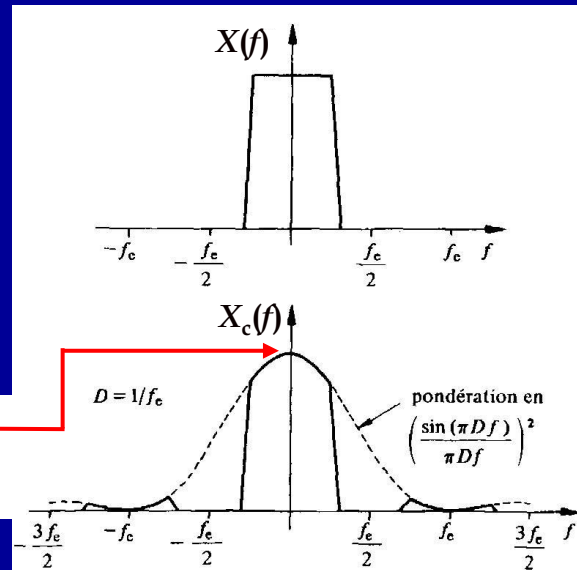
con $T_w < T_c \ll 1/f_{\max}$ "va tutto bene":
 $\text{sinc}(\pi f T_c) \cong 1$ e $\exp(-j\pi f T_c) \cong 1$
 $\text{sinc}(\pi f T_w) \cong 1$ e $\exp(-j\pi f T_w) \cong 1$

$$x_c(t) = x(t) \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \text{rect}[(t - kT_c)/T_w]$$

si campiona con una funzione a rettangolo
anziché con una δ di Dirac



segnale campionato
(dominio spettrale)



per $fT_c \ll 1$
l'errore è trascurabile

distorsioni su
ampiezza e fase del
segnale ricostruito

$$\Rightarrow T_c \ll 1/f_{\max}$$

$$\Rightarrow f_{\max} \ll 1/T_c$$

$$X_c(f) = f_c T_w \frac{\sin(\pi f T_w)}{(\pi f T_w)} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} X(f - m f_c) e^{-j\pi f T_w} \frac{\sin \pi T_c (f - m f_c)}{\pi T_c (f - m f_c)} e^{-j\pi f T_c}$$

Soluzione Pb. campionamento reale

Per sistemi DAQ con requisiti di accuratezza elevati le **distorsioni** introdotte dal campionamento reale devono essere **calcolate e valutate rispetto al rumore**

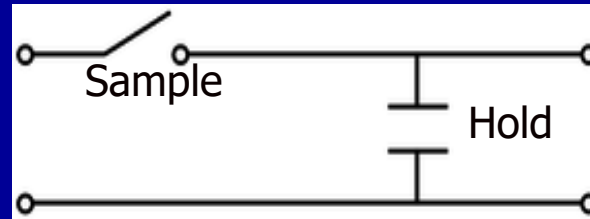
Non saranno accettabili distorsioni che producono errori sul segnale confrontabili con il **limite di rumore imposto dal numero di bit equivalenti**

Per ridurre gli effetti provocati dall'*aliasing* e dalla durata finita del campionamento **si adottano frequenze di campionamento ben superiori al limite imposto dal teorema di Shannon**

(ad esempio $f_c = 10f_{c,\min} = 20f_{\max} = 20f_{s,\max}$ SOVRACAMPIONAMENTO)

Naturalmente $T_w < T_c$ e magari $T_w \ll T_c \Rightarrow T_w \ll 1/f_{\max}$

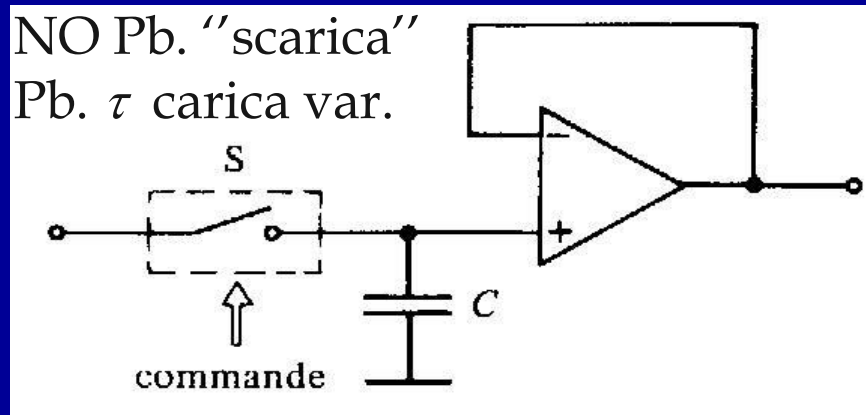
Campionatore Sample&Hold (S/H)



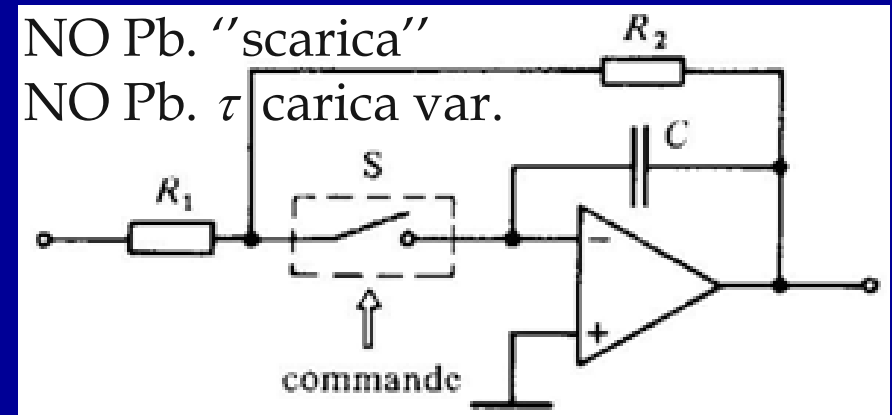
Pb. "scarica"

Pb. τ carica var.

A interruttore chiuso, la tensione campionata viene "memorizzata" su un **condensatore** (memoria analogica) che poi la "mantiene" quando l'interruttore resta aperto



$T_w \approx \tau = R_s C$ dipende da $R_{s,s}$



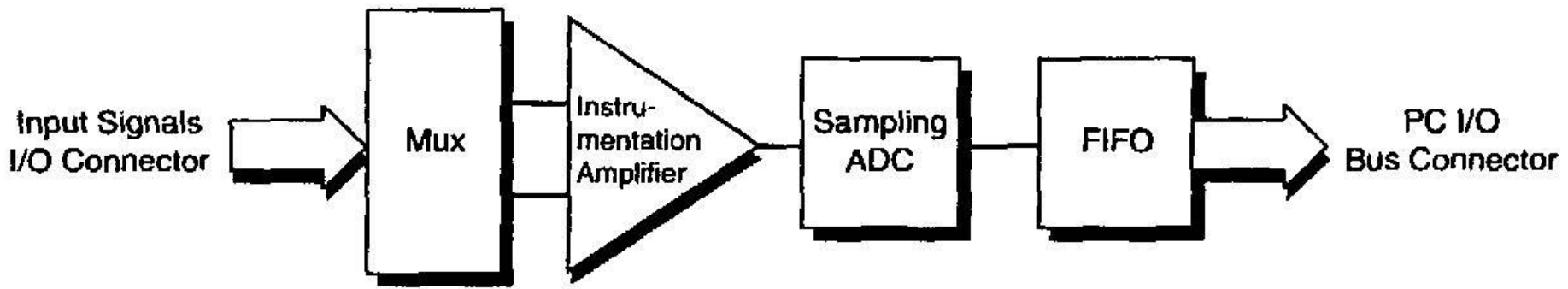
$T_w \approx \tau = R_2 C = \text{cost.}$

Pb. non-idealità da **correnti di perdita** \rightarrow **C "alto"**:

I_{loss} in **interruttore S** o **condensatore C** (o **operazionale**)

SCHEDA DI ACQUISIZIONE DATI (DAQ) Data Acquisition

Scheda di acquisizione dati (DAQ)



Multiplexer – permette di selezionare i diversi ingressi disponibili (di tipo *single-ended* o di tipo **differenziali**) e di inviarli all'unico IA (*Instrumentation Amplifier*) che accoppia un segnale alla volta verso l'ADC

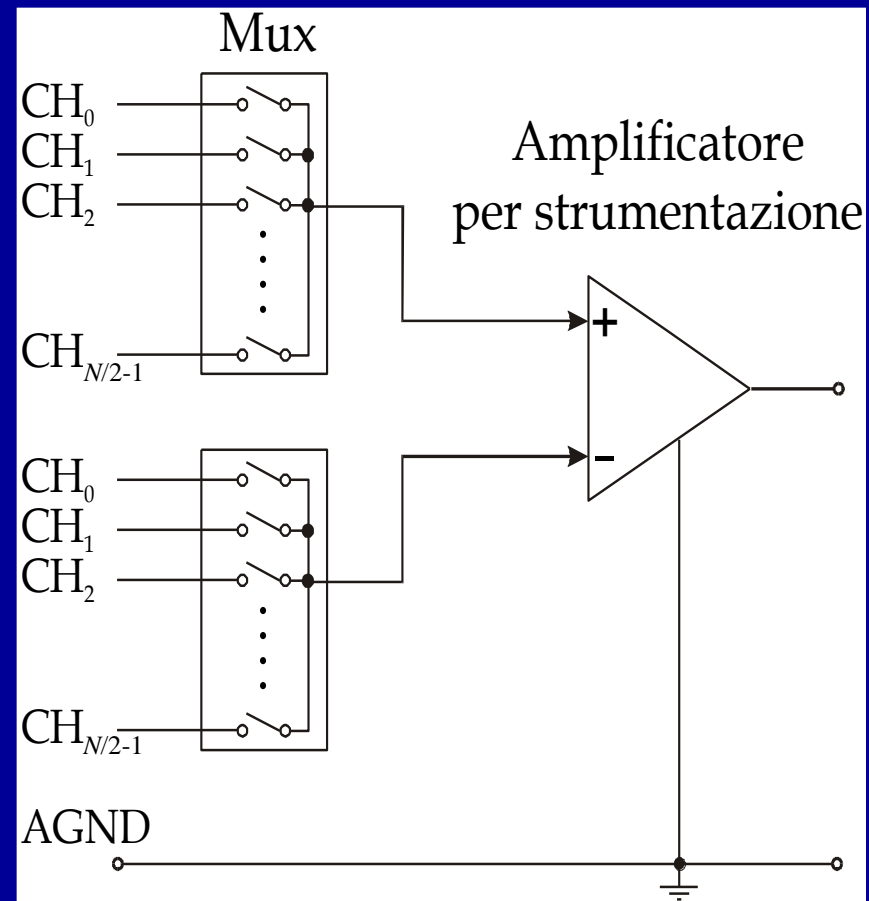
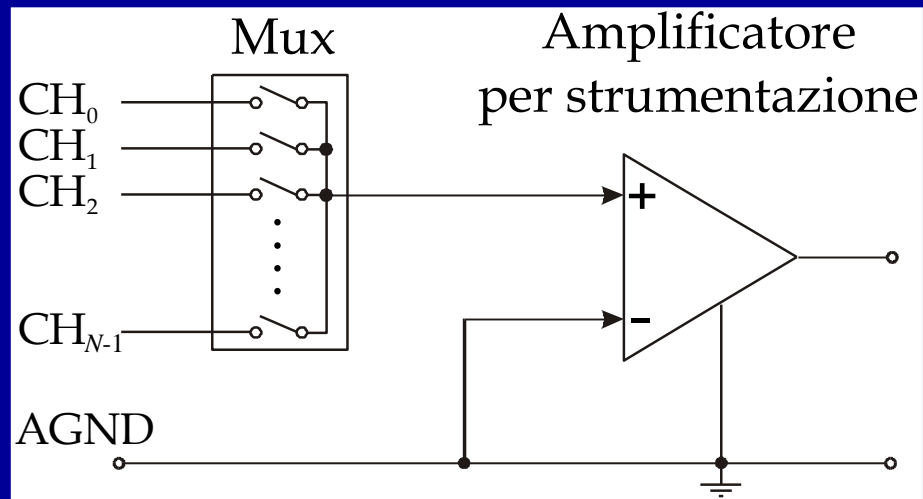
Amplificatore per strumentazione (WB, con guadagno variabile) – consente di utilizzare la piena dinamica del convertitore (ADC) e amplifica ($V_{IN,i}-GND$) oppure ($V_{IN,i}-V_{IN,j}$)

Campionatore+ADC – converte la tensione in valore numerico

FIFO – consente di inviare sul bus dati del PC e/o direttamente in memoria RAM (**DMA**) i dati acquisiti

Le schede dispongono anche di **uscite analogiche (DAC)**, di **linee di I/O Input/Output**, e di **sincronizzazioni analogiche e digitali (*trigger* e *timer*)**

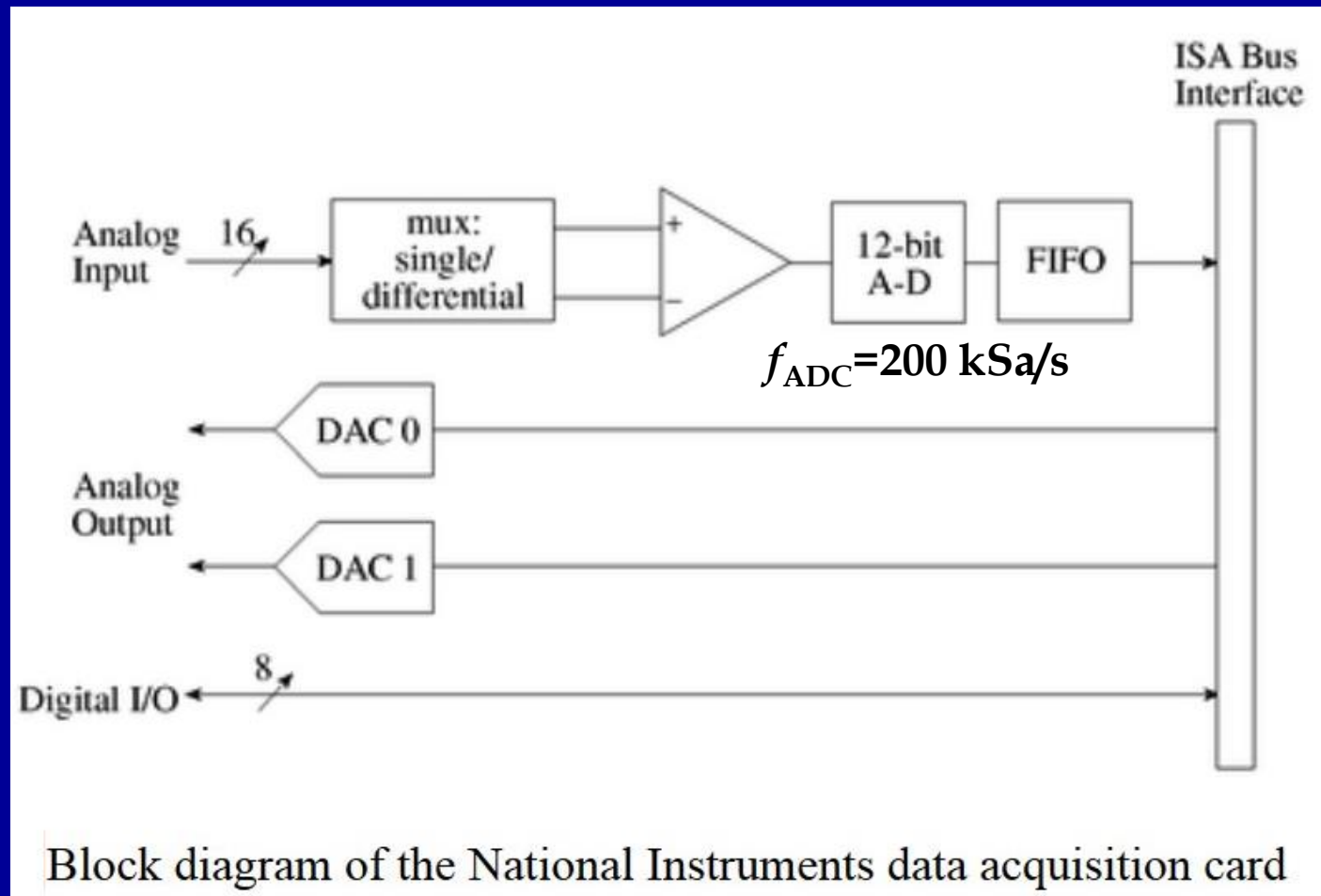
Ingressi *single-ended* o differenziali



Se il MUX ha N ingressi (fili) fare esempio
la scheda avrà con $N=16$
 N ingressi *single-ended* (1 filo)
 $N/2$ ingressi **differenziali** (ciascuno con 2 fili o una coppia di fili)

Numero tipico dei canali analogici d'ingresso: 8-16-...-80 canali

Scheda di acquisizione dati di NI



Schema a blocchi semplificato delle schede DAQ
dei **Laboratori** Didattici sperimentali di via **Golgi** $f_{Sa} = 200 \text{ kHz}$
 $n = 12 \text{ bit}$

Frequenza di campionamento

Frequenza di campionamento – La massima frequenza a cui la DAQ (l'ADC) può digitalizzare il segnale. Certo si potrà digitalizzare il segnale anche a frequenze inferiori.

Effettuando un **campionamento multicanale** (su più segnali acquisiti “in parallelo”, N_S), la massima freq. camp. sul singolo canale diviene:

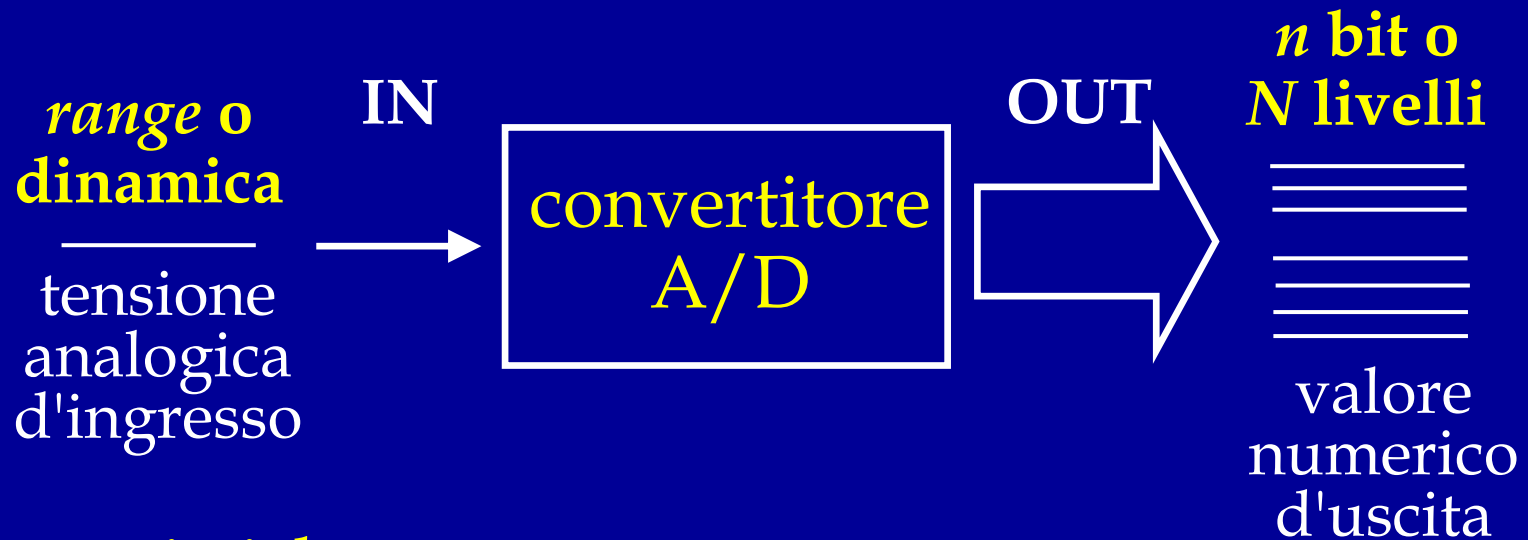
$$f_{Sa, N_S \text{ ingressi}} = \frac{f_{Sa, ADC, \max}}{N_S}$$

Valori tipici per la frequenza di campionamento nel caso di schede *general purpose*:

$$10 \text{ kSa/s} < f_{\text{sample}} < 10 \text{ MSa/s}$$



Caratteristiche della Scheda e del convertitore A/D



Caratteristiche:

DINAMICA: D [V]

RISOLUZIONE: n [bit] o N [livelli] o $\Delta V = D/N$ [V]

VELOCITA': f_c [Hz] o T_c [s] o f_{sa} [Sa/s]

RUMORE ELETTRON. V_{eff} [mV] o **BIT EQ.** n_e [bit]

COSTO [€] e **CONSUMO** [mW]

Dinamica ADC

Dinamica ADC: D_{ADC}

è fissa (non sempre adatta al segnale)



Si massimizza la risoluzione
sul segnale amplificandolo

$$G = D_{ADC} / D_{S(\text{segnale})}$$

Guadagni tipici dell'amplificatore
combinati con $D_{ADC} = \pm 5 \text{ V}$:

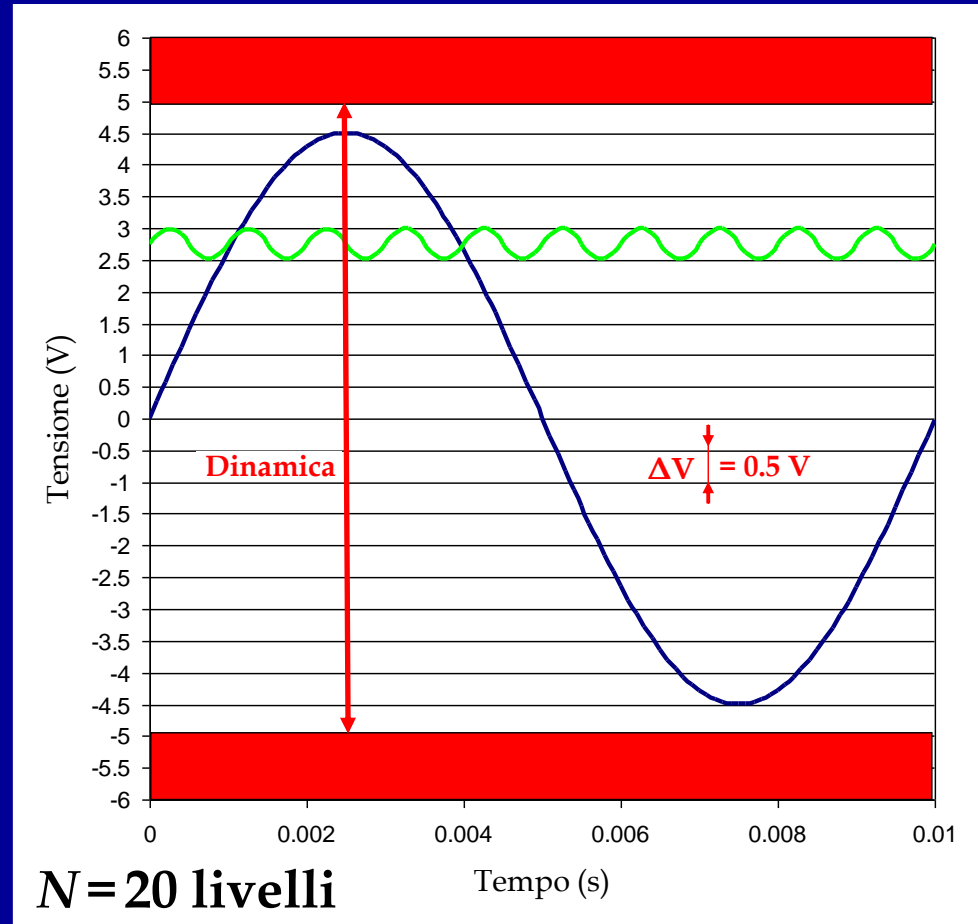
$$G=100 \quad D_s = \pm 50 \text{ mV}$$

$$G=10 \quad D_s = \pm 0.5 \text{ V}$$

$$G=1 \quad D_s = \pm 5 \text{ V}$$

$$G=0.5 \quad D_s = \pm 10 \text{ V}$$

$$\Delta V = D_s / N = D_s / 2^n = (100\text{mV}, 1\text{V}, 10\text{V}, 20\text{V}) / 2^n \\ = 25\mu\text{V}, 250\mu\text{V}, 2.5\text{mV}, 5\text{mV} @ n=12\text{bit}$$



Risoluzione ADC e scheda DAQ

Risoluzione – E' il numero di bit (n) che l'ADC usa per rappresentare il **segnale analogico in ingresso**. Maggiore è la risoluzione, maggiore è il numero di livelli ($N=2^n$) in cui la dinamica dell'ADC (D_{ADC}) è suddivisa: la tensione minima rilevabile (ris. dim. ΔV) varia in funzione della dinamica del segnale d'ingresso e del guadagno G dell'amplificatore.
La **minima tensione rilevabile (ris. dim.)** per una DAQ è :

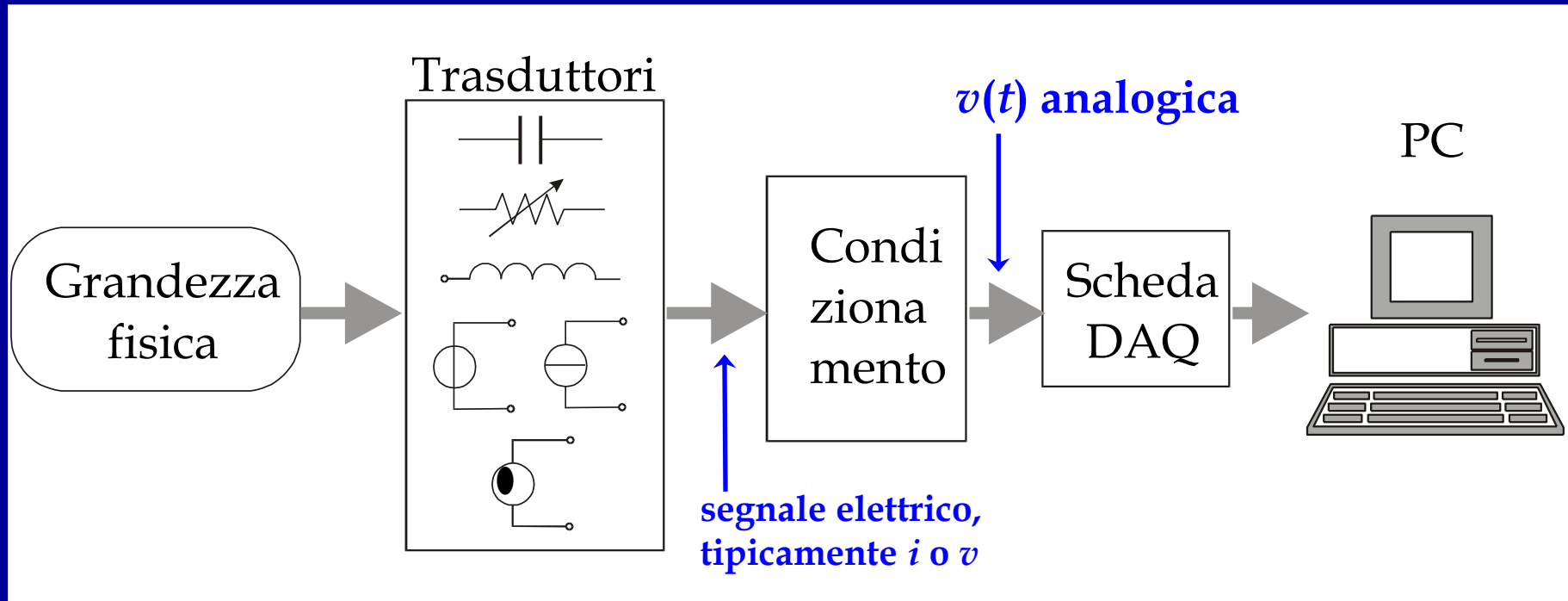
$$\Delta V = \frac{D_{\text{ADC}}}{G \times 2^n} \quad \text{risoluzione dimensionale}$$

$$\delta = \frac{1}{N} = \frac{1}{2^n} \quad \text{ris. adim.}$$

Risoluzioni tipiche di una DAQ: 12-18 bit ($\delta = 0.25 \times 10^{-3} \div 4 \times 10^{-6}$)

La risoluzione è solo una delle caratteristiche che descrivono l'**accuratezza** della DAQ. **Rumore elettronico ed errori** (di linearità, di *offset*, di guadagno) devono essere considerati per descrivere completamente l'accuratezza \Rightarrow **bit equivalenti**

Acquisizione dati dal mondo fisico

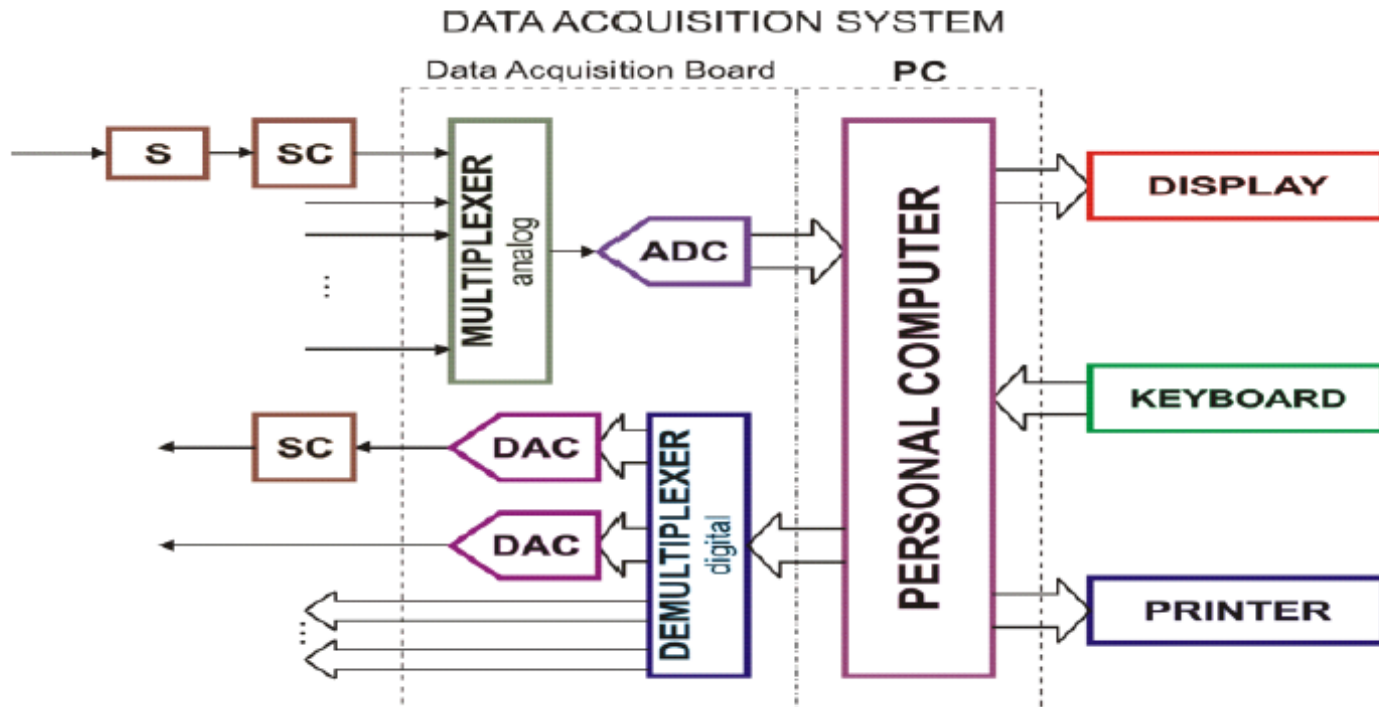


**Fenomeno fisico → Trasduttore → Condizionamento →
Scheda DAQ → PC+DSP (elaborazione e visualizzazione)**

ACQUISIZIONE e ANALISI dei DATI

Sistema di acquisizione dati

Data Acquisition Systems: block diagram



Block diagram of a data acquisition system

- Data Acquisition System: measurement system that use the processing power of a computer:
 - External circuits
 - Data Acquisition (DAQ) board
 - Personal Computer

PROTOCOLLI DI COMUNICAZIONE

Interfaccia seriale RS-232

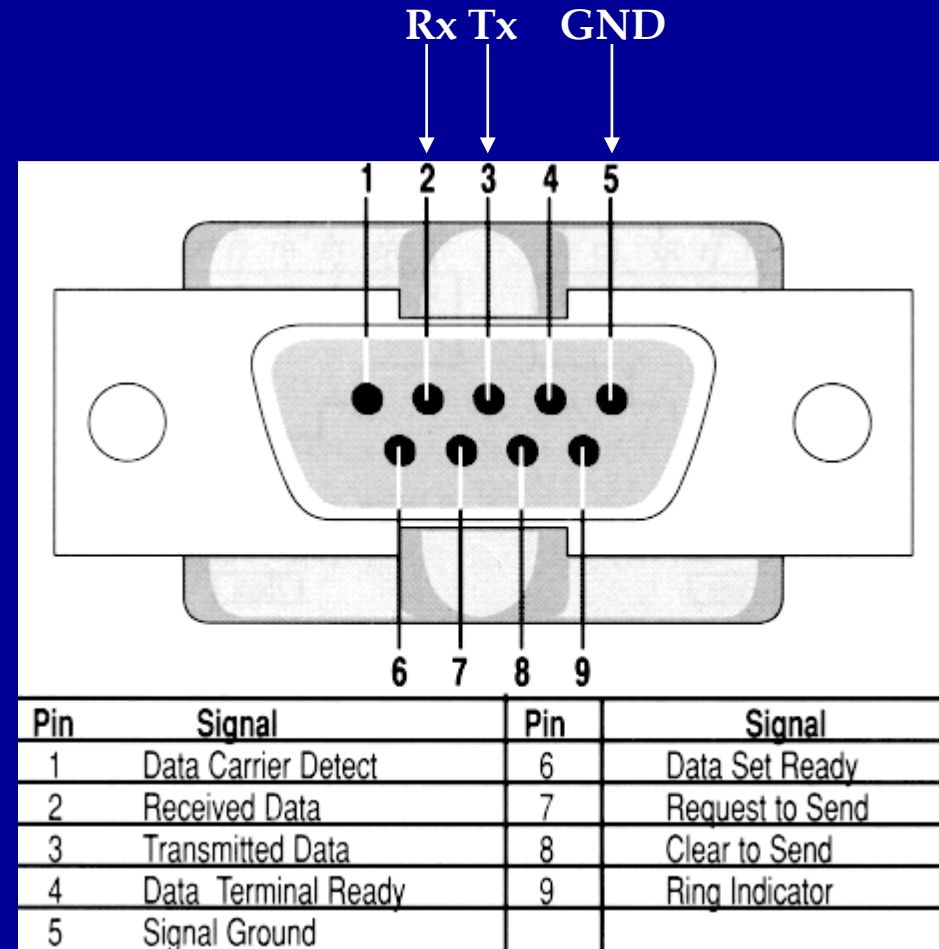
La comunicazione seriale avviene attraverso **tre linee**:

(2) **RX** ricezione;
(3) **TX** trasmissione;
(5) linea di massa **GND**;
(i livelli RX e TX sono quindi riferiti al GND)

Altre linee possono essere disponibili ma in generale non sono richieste

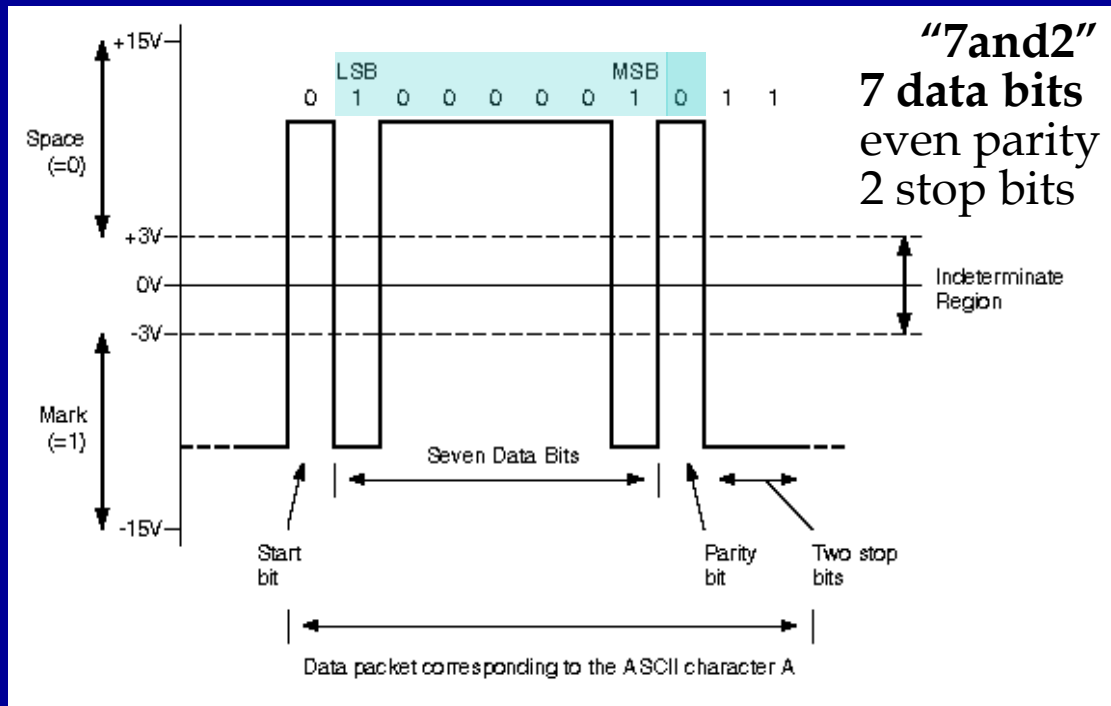
La comunicazione è **asincrona** (non si usa un segnale di *clock*)

Sono collegabili tra loro solo 2 dispositivi (uno parla e l'altro ascolta)



Interfaccia seriale RS-232

Il livello di tensione corrispondente allo stato **alto** (1) è compreso tra **+3 V e +12 V** mentre lo stato logico **basso** (0) è tra **-3 V e -12 V** (nel PC o nel dispositivo, invece sul cavo i livelli sono opposti).



bit signals
in the cable

**protocollo
seriale con
bassa velocità
di trasmissione**

Parametri fondamentali di questo **protocollo seriale** sono:
baud rate (velocità trasmissione ≈ 9.6 kbit/s), **data bits (6, 7, 8, 9)**,
e parity bit (se c'è è 1). Il singolo messaggio trasmesso è un pacchetto
costituito dai bit di start (1), bit dati (6,7,8,9), parità (1) e stop (2)

per trasmettere da 6 a 9 bit di dati

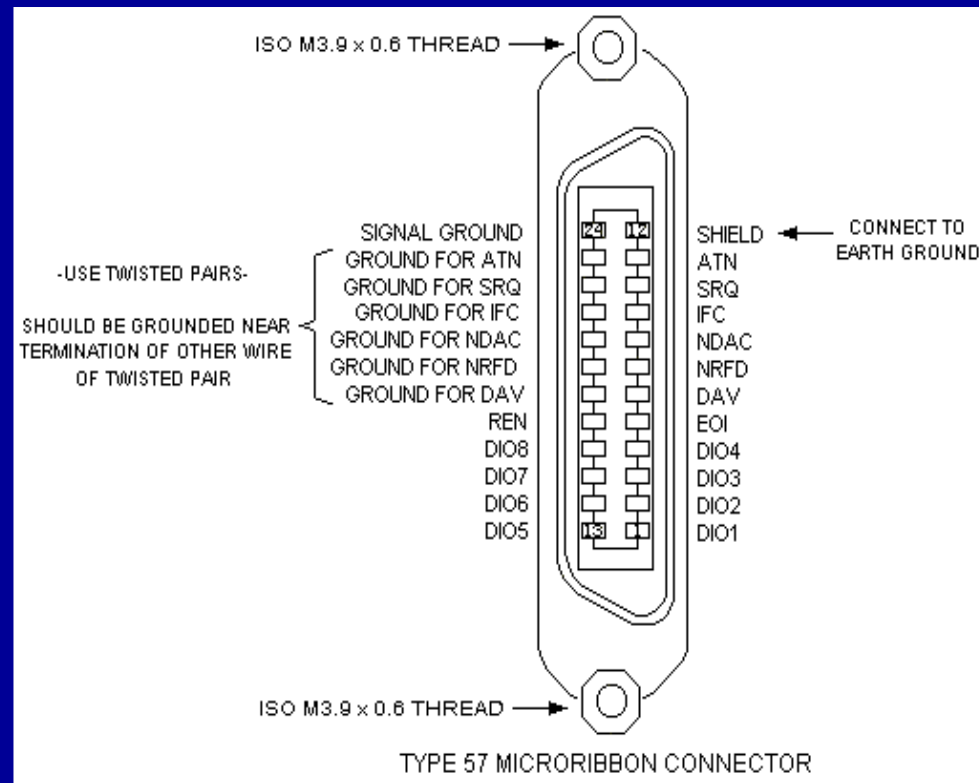
Campionamento, Schede DAQ, Protocolli

occorrono da 10 a 13 bit

Interfaccia IEEE-488 (GPIB o HP-IB)

Le caratteristiche essenziali dell'interfaccia parallela GPIB (*General Purpose Interface Bus* o *Hewlett-Packard Instrument Bus*) sono :

- 8 linee dati (DIO1-DIO8, TTL 0-5 V), 5 linee di gestione dell'interfaccia e 3 linee di *handshake*
- il codice di trasferimento dei dati è ASCII a 7 bit + 1 bit di parità (1 dato = 8 bit = 1 byte)
- il numero massimo di dispositivi collegabili è 15 con lunghezza massima di collegamento pari a 20 m
- velocità massima di trasmissione da 1 a 8 MB/s (tra strumenti ≈ 400 kbyte/s)
- ogni strumento collegato ha il suo indirizzo GPIB



Interfaccia IEEE-488 (GPIB)

Ognuno dei dispositivi collegati al bus può assumere uno dei **tre ruoli attivi (modalità)**:

- **LISTENER** (ascoltatore) \Rightarrow riceve i dati
- **TALKER** (parlatore) \Rightarrow trasmette i dati
- **CONTROLLER** (controllore) \Rightarrow gestisce il bus

Un dispositivo può anche assumere più di un ruolo. La minima configurazione richiede **un controller** e *un talker* o *un listener*.

Esiste anche un **quarto ruolo** detto *idler* (ozioso) in cui il dispositivo è in fase di attesa

protocollo parallelo
con media velocità
di trasmissione



GPIB-01

Interfaccia USB

L'*Universal Serial Bus* (USB) è uno standard di comunicazione seriale che consente di collegare **diverse periferiche** tra loro o a un computer (**fino a 127** compresi gli *hub* di connessione delle periferiche).

Impiega solo 4 fili:

- 1 **VBUS** \Rightarrow alimentazione (+5 V)
- 2 **D⁻** (Data -) \Rightarrow "ricezione" dati
- 3 **D⁺** (Data +) \Rightarrow "trasmissione" dati
- 4 **GND** \Rightarrow riferimento di massa

I dati sono **tensioni differenziali** con $\Delta V = (D^+ - D^-)$; "1" $\Leftrightarrow \Delta V > 0.2V$ e "0" $\Leftrightarrow \Delta V < -0.2V$

Velocità di trasferimento dati:

USB 1.0 (<i>Low-Speed</i>)	\Rightarrow <u>1.5</u> Mbit/s
USB 1.1 (<i>Full-Speed</i>)	\Rightarrow <u>12</u> Mbit/s
USB 2.0 (<i>Hi-Speed</i>)	\Rightarrow <u>480</u> Mbit/s
USB 3.0 (<i>Super-Speed</i>)	\Rightarrow <u>4.8</u> Gbit/s
USB 3.1 (<i>Super-Speed+</i>)	\Rightarrow <u>10</u> Gbit/s

Trasmissione in modalità *half duplex* (monodirezionale alternata)



**protocollo
seriale con
alta velocità
di trasmissione**

Interfaccia USB

Quando una periferica o un *hub* viene connesso alla struttura ad albero gli viene **assegnato un indirizzo logico**. Dopo essersi sincronizzato con il *clock* del ricevitore invia un stringa di bit indicando quale **tipo di trasferimento dati** eseguire:

- 1 **Control transfer** \Rightarrow configurazione/verifica/controllo dello stato
- 2 **Isosynchronous transfer** \Rightarrow **trasmissione continua** o *streaming*
(in modo sincrono con un timer)
- 3 **Interrupt transfer** \Rightarrow **trasmissione prioritaria** di pochi dati
(latenze minime garantite)
- 3 **Bulk transfer** \Rightarrow **trasmissione non-prioritaria** di molti dati
(latenze non garantite)

Un **singolo cavo USB** può essere **lungo fino a 5 m** ma, collegando degli *hub* alimentati, le **periferiche** possono distare **fino a 30 m dall'utilizzatore**

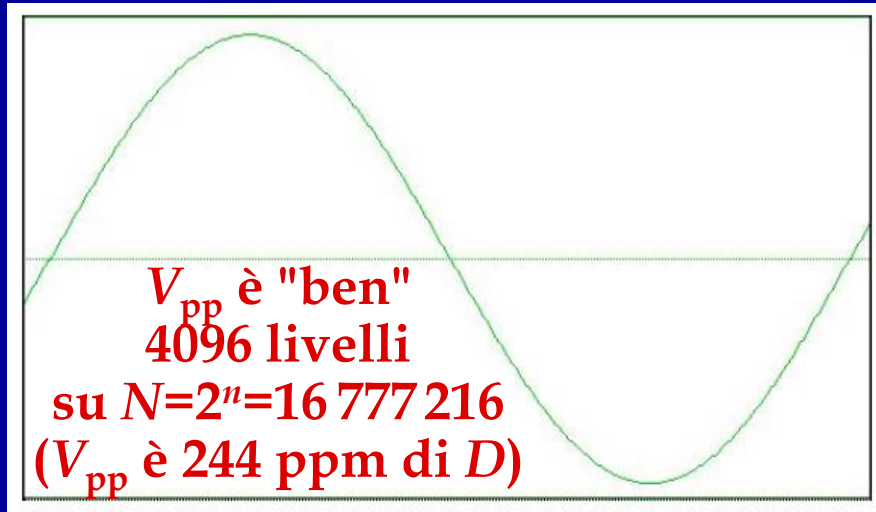
Sulla connessione di alimentazione (VBUS) un PC può erogare **fino a 500 mA di corrente a 5 V**. Così è possibile anche alimentare periferiche a “basso consumo” (potenza **<2.5 W**)

MIGLIORARE LA RISOLUZIONE NEGLI ADC

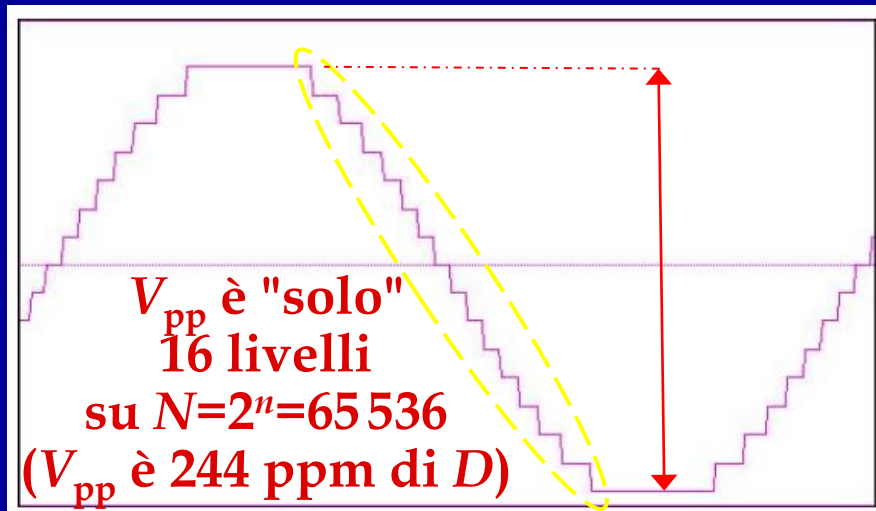
Sommario

- Rumore di quantizzazione
- *Dithering*
- *Dithering + Averaging*
- *Oversampling + Averaging*
- *Oversampling + Noise-shaping*

Rumore di quantizzazione (1/2)

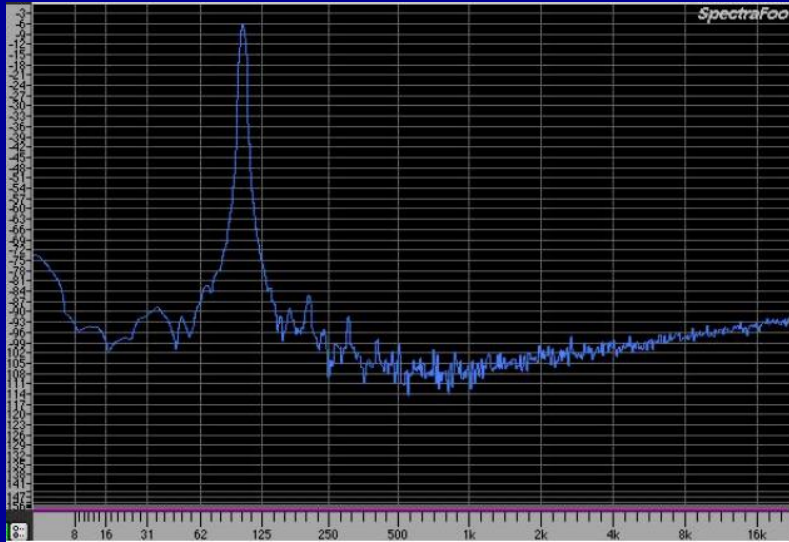


Sinusoide a 100 Hz
quantizzata a **24 bit**
("appare" continua)
 $\delta=1/N=2^n=60\text{ppb}$

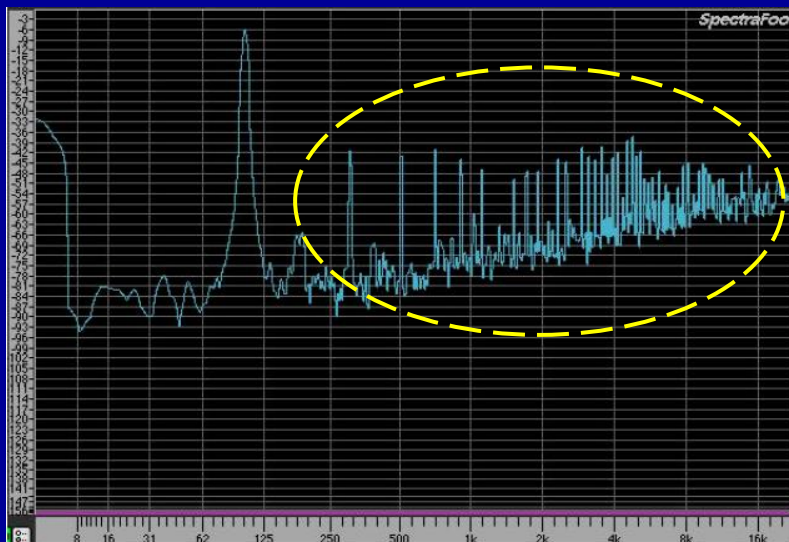


Sinusoide a 100 Hz
quantizzata a **16 bit**
("appare" discreta)
ci sono dei **SALTI**
 $\delta=1/N=2^n=15\text{ppm}$

Rumore di quantizzazione (2/2)



Spettro sinusoide
a **24 bit**



Spettro sinusoide
a **16 bit**
compare del rumore in
alta frequenza

Dither – l'origine

...one of the earliest [applications] of **dither** came in World War II.

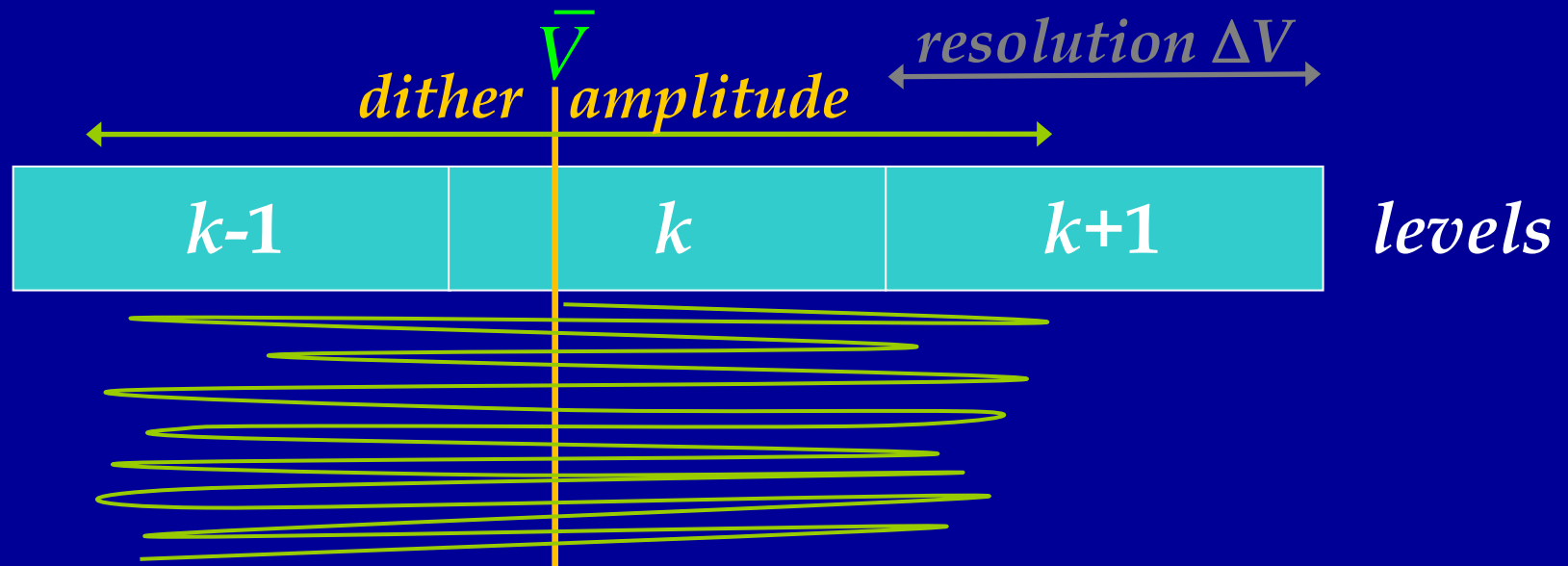
Airplane bombers used mechanical computers to perform navigation and bomb trajectory calculations. Curiously, these computers (boxes filled with hundreds of gears and cogs) performed more accurately when flying on board the aircraft, and less well on ground. Engineers realized that the **vibration from the aircraft reduced the error from sticky moving parts.** Instead of moving in short jerks, they moved more continuously. Small vibrating motors were built into the computers, and their vibration was called 'dither' from the Middle English verb 'didderen,' meaning 'to tremble.' ... **In minute quantities, dither successfully makes a digitization system a little more analog in the good sense of the word.**

Ken Pohlmann, *Principles of Digital Audio*

Nella **quantizzazione di un segnale** di tensione si produce inevitabilmente un errore, tuttavia è importante riuscire a operare con sistemi nei quali **l'errore di quantizzazione non si ripete sempre uguale** (deterministicamente) quando in ingresso c'è lo stesso valore analogico da convertire in digitale

Dither - il concetto di base

L'idea di base delle tecniche di *dithering* è di **aggiungere un rumore** (variazioni casuali d'ampiezza) per **evitare** la suddivisione **deterministica** del segnale in **passi di quantizzazione** dell'ADC



V ottenuto come media di più letture che interessano tutti e 3 i livelli ($k-1, k, k+1$) **ha una risoluzione migliore** di quella corrispondente al singolo livello

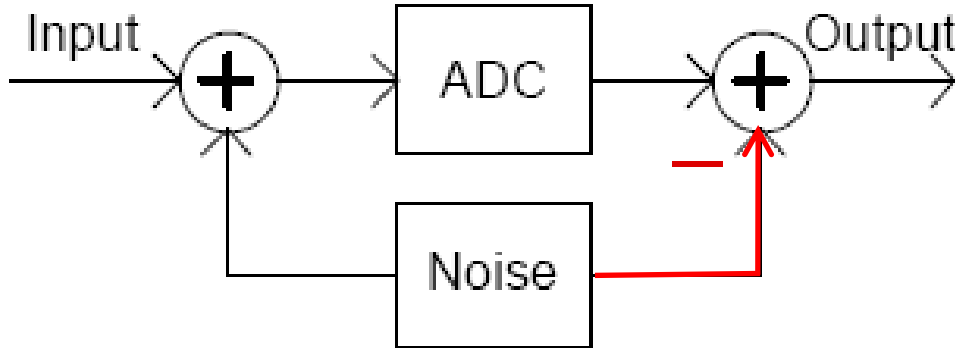
Dither - tecniche

Il *dithering* può essere ottenuto con l'**aggiunta di rumore analogico sulla tensione d'ingresso** all'ADC.

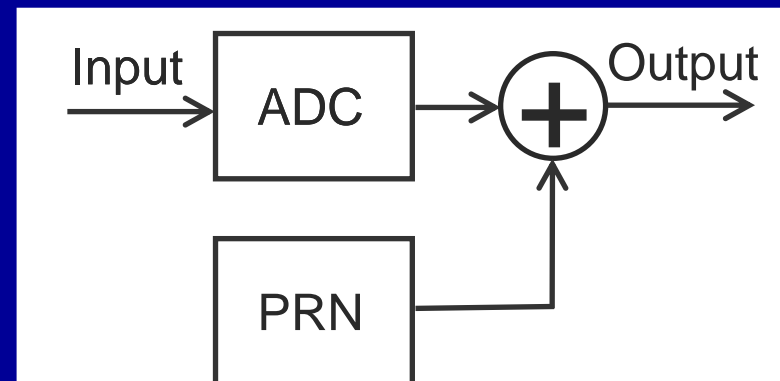
In questo caso la fluttuazione introdotta in ingresso analogicamente può anche essere sottratta in uscita numericamente.

In ogni caso **l'operazione di media, che diminuisce il rumore, diminuisce anche la velocità di acquisizione.**

Oppure si può operare digitalmente mediante **somma di numeri pseudocasuali sui valori numerici acquisiti**



“rumore aggiunto e tolto”



“rumore solo aggiunto”

occorre poi mediare
i numeri acquisiti

Dither — tipo di rumore aggiunto

TriPDF *Triangular Probability Density Function*

RectPDF *Rectangular Probability Density Function*

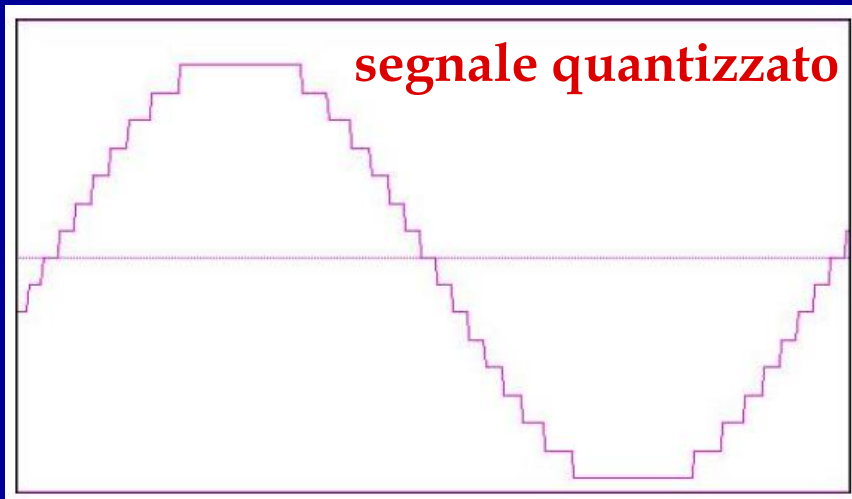
Gaussian PDF

Colored Dither

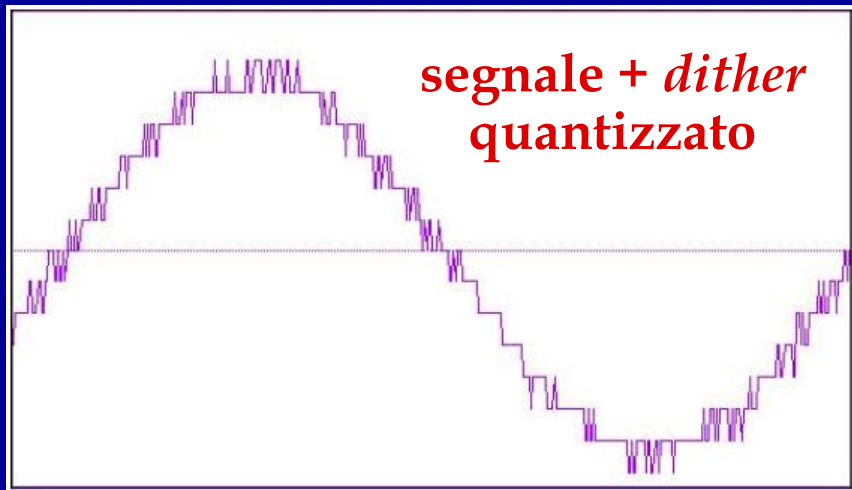
Ad es. l'**ampiezza** ottimale per un *dither* RectPDF è uguale a **2 passi di quantizzazione**

Per convertitori con elevato numero di bit, un ***dither* naturale (rumore analogico)** è sempre presente sul segnale d'ingresso all'ADC

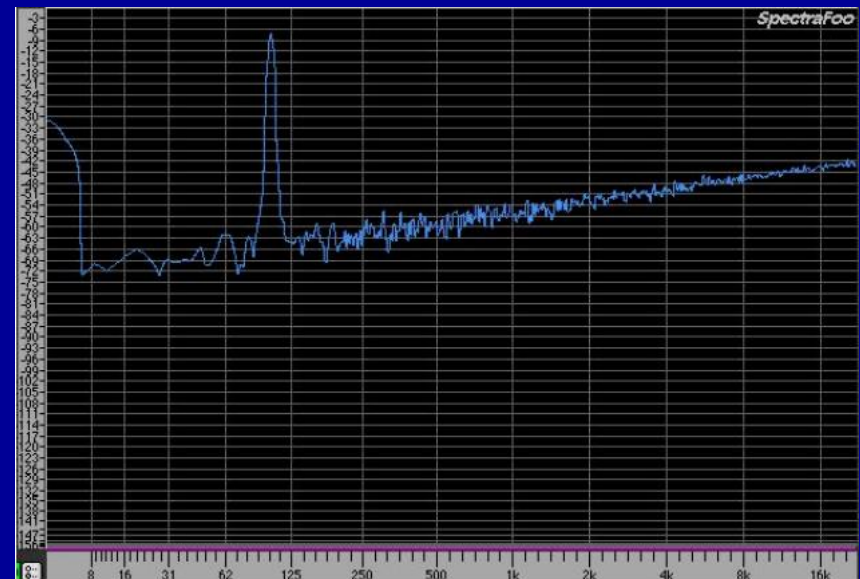
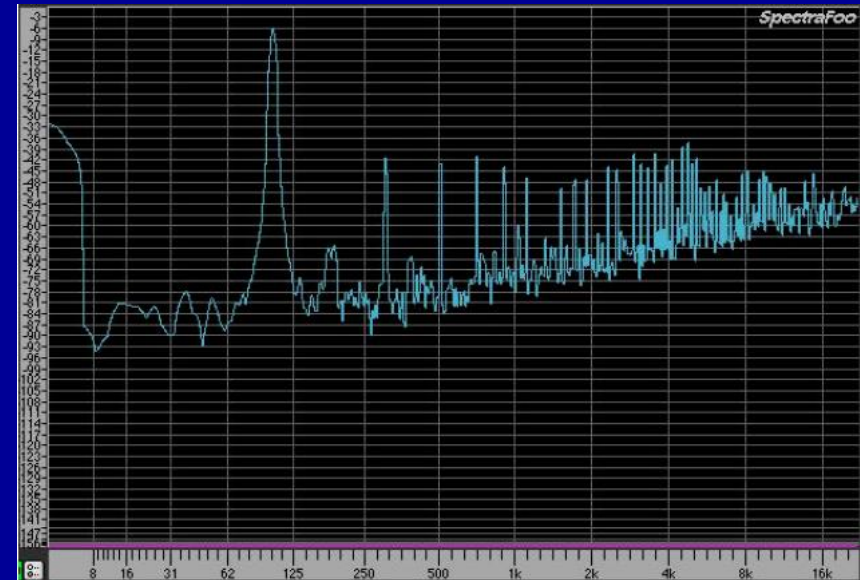
Dither – risultati (16 bit)



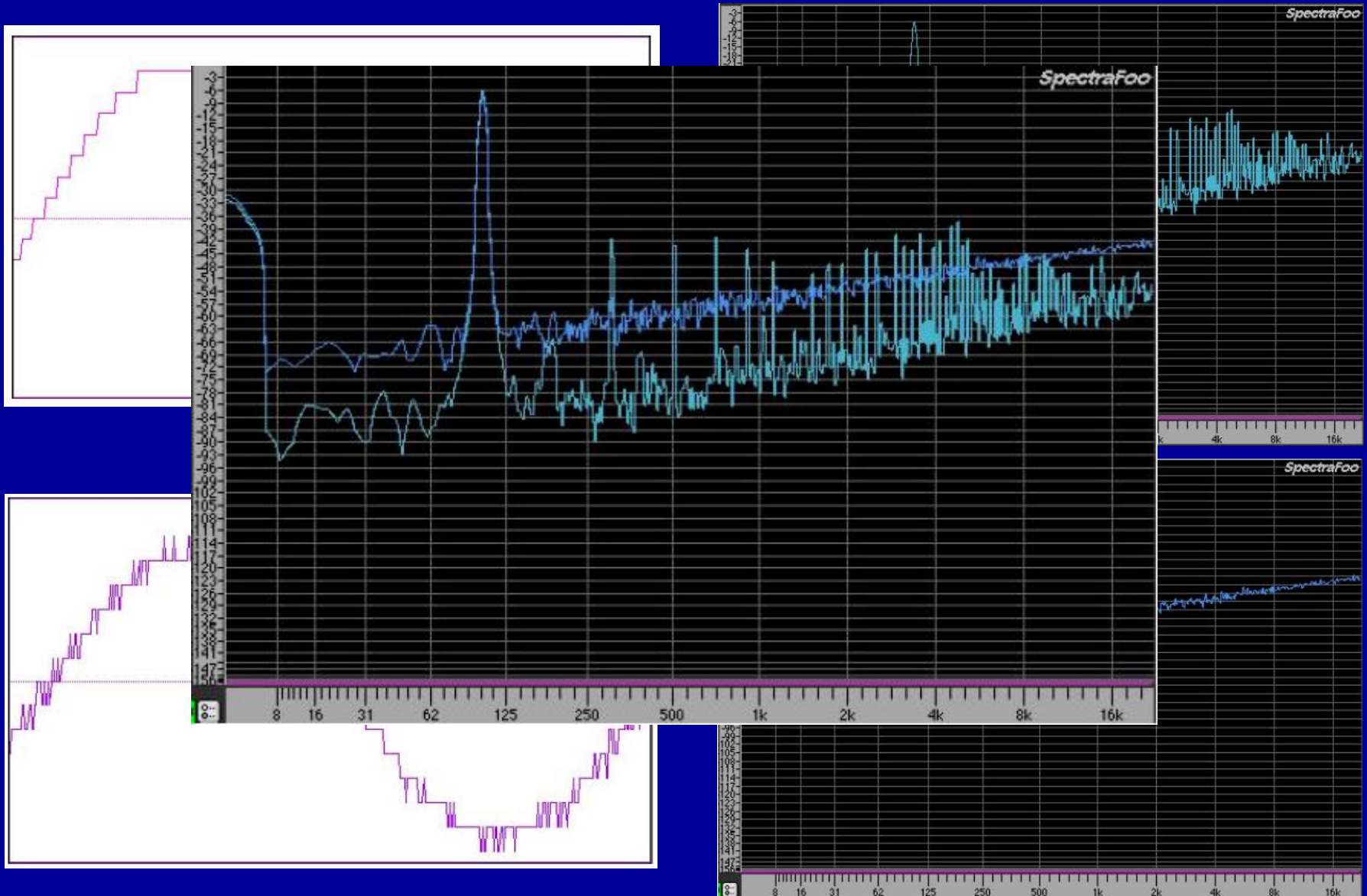
Scompaiono i picchi...



ma sale il fondo di rumore
(rumore bianco!)



Dither – risultati (16 bit)



Dither e misura da valor mediato

Esempio/ esercizio: misura di $V=7.77$ V con un convertitore A/D che quantizza (grossolanamente) con risoluzione $\Delta V=1$ V

Dalla media di 30 dati con *dither* aggiunto (RectPDF ± 1 V), si ottiene un **valor medio $V=7.7$ V**

Passando a **100 dati** con *dither* aggiunto (RectPDF ± 1 V) si ottiene infine una **media $V=7.77$ V**

(1) sample	ANALOG		DIGITAL	
	(V) V	(V) V+dither	(V) V	(V) V+dither
1	7.77	7.05676	8	7
2	7.77	8.5983	8	9
3	7.77	7.85038	8	8
4	7.77	7.26512	8	7
5	7.77	8.4093	8	8
6	7.77	7.24182	8	7
7	7.77	8.57636	8	9
8	7.77	7.9211	8	8
9	7.77	8.06754	8	8
10	7.77	7.80902	8	8
11	7.77	8.27516	8	8
12	7.77	7.27494	8	7
13	7.77	8.53144	8	9
14	7.77	8.74354	8	9
15	7.77	6.81698	8	7
16	7.77	7.72636	8	8
17	7.77	7.47034	8	7
18	7.77	7.55688	8	8
19	7.77	7.37336	8	7
20	7.77	7.7633	8	8
21	7.77	7.31006	8	7
22	7.77	6.84034	8	7
23	7.77	7.4291	8	7
24	7.77	7.90914	8	8
25	7.77	8.25584	8	8
26	7.77	7.47224	8	7
27	7.77	8.25824	8	8
28	7.77	7.52166	8	8
29	7.77	7.00482	8	7
30	7.77	7.94496	8	8

7.743

AVERAGE

7.8 7.7

7.733

AVERAGE

8.0

7.7