



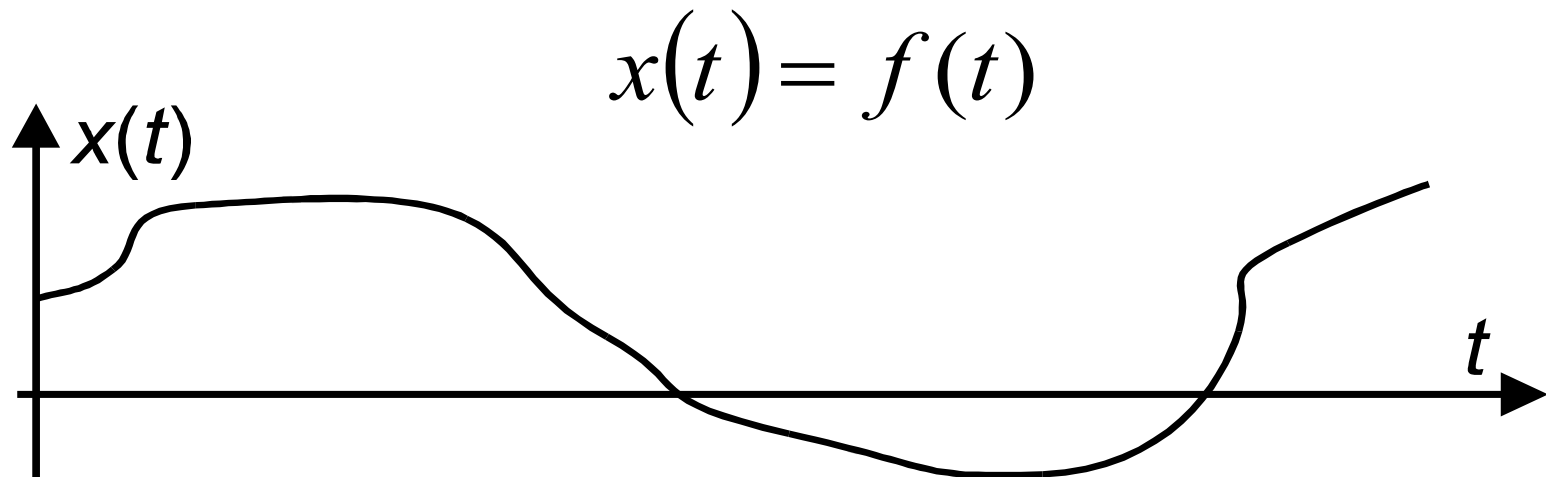
Principi della conversione analogico/digitale (A/D)

Principi della conversione AD

● Segnali analogici vs sequenze digitali

■ Le grandezze fisiche in misura sono **analogiche**

- ✓ Possono essere rappresentate mediante funzioni continue di variabili continue



Principi della conversione AD

- **Segnali analogici vs sequenze digitali**

- Nel mondo **digitale (numerico o numerale)** si manipolano sequenze di numeri

- ✓ Queste sequenze sono solitamente rappresentate mediante funzioni discrete di variabili discrete

$$x[k] = f[kT_c]$$

- Minori informazioni rispetto al segnale analogico

- ✓ Possono essere rappresentati solo un numero finito di valori (**quantizzazione**)
- ✓ La sequenza esiste solo in istanti di tempo discreti (**campionamento**)

Principi della conversione AD

● Perché impiegare sequenze digitali?

■ Rispetto ai segnali analogici, le sequenze digitali:

- ✓ sono facilmente elaborabili mediante diversi dispositivi, quali microprocessori, microcontrollori e *Digital Signal Processor* (DSP)
- ✓ possono essere memorizzate più facilmente, in volumi ridotti ed in modo più stabile nel tempo
- ✓ presentano una migliore reiezione al rumore
- ✓ possono essere facilmente trasmesse a distanza

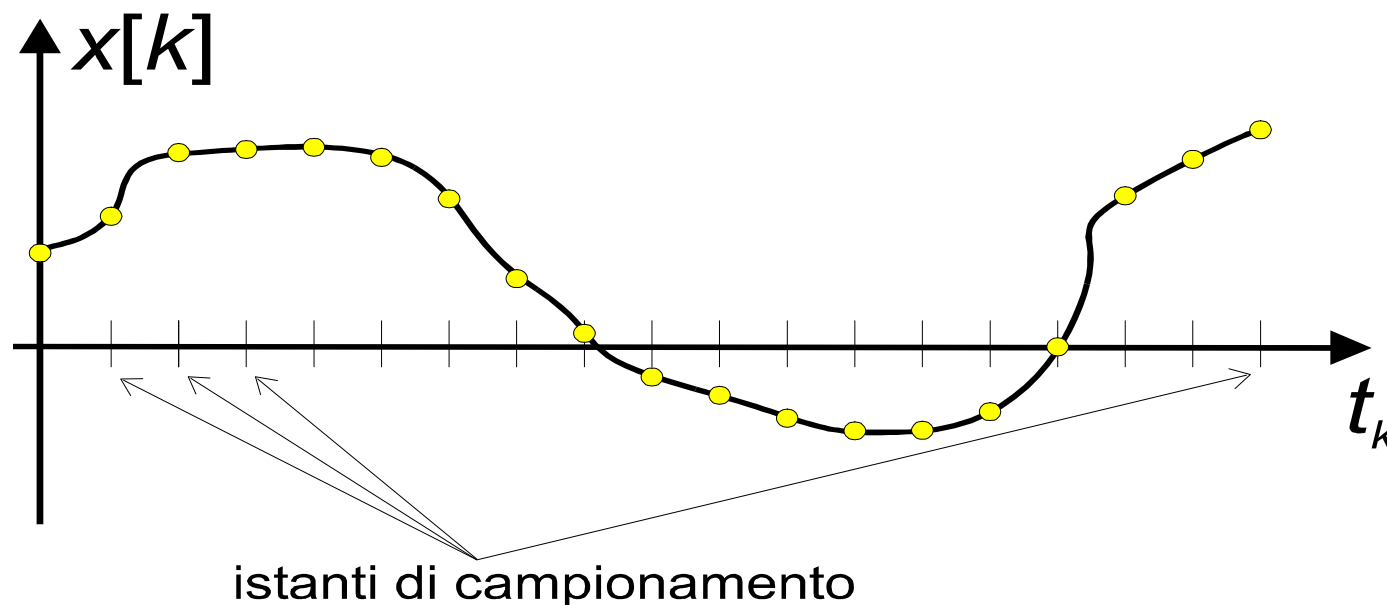
Principi della conversione AD

- **Come si ottiene la versione digitale di un segnale analogico?**
 - Attraverso il processo di **conversione analogico/digitale**, che può essere suddiviso in tre fasi distinte:
 - 1) campionamento del segnale nel dominio del tempo
 - 2) discretizzazione (quantizzazione) del segnale nel dominio dell'ampiezza
 - 3) codifica

Principi della conversione AD

● La fase di campionamento

- Dal segnale analogico si estraggono **campioni** in determinati istanti (di campionamento)

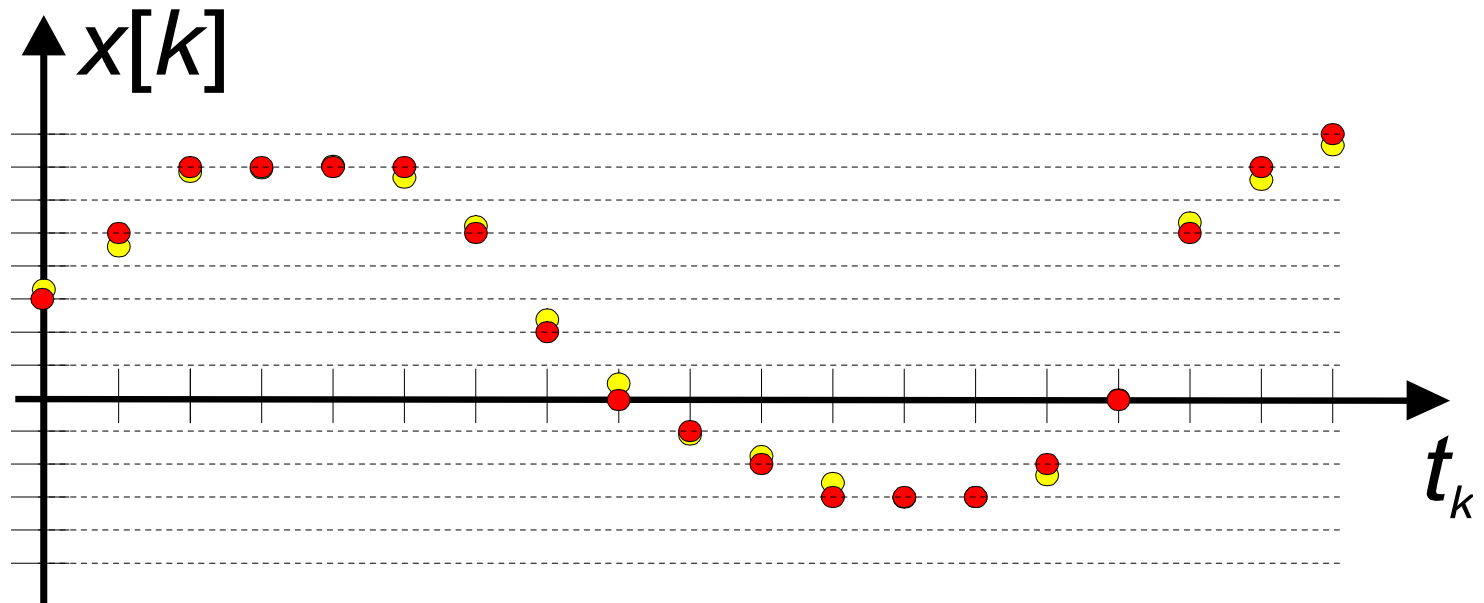


NOTA: il segnale è ancora continuo in ampiezza

Principi della conversione AD

● La fase di quantizzazione

- Il campo continuo *FR* (*Full Range*) dei valori assunti dal segnale analogico è suddiviso in stati discreti e ciascun campione (●) è associato allo stato più vicino (●)



Principi della conversione AD

● La fase di codifica

- Si associa un codice numerico a ciascuno stato discreto in cui è stato suddiviso il campo FR dei valori assunti dal segnale analogico
 - ✓ Suddivisione dell'intervallo FR in B^N stati discreti
 - B : base numerica
 - N : numero dei caratteri
- Solitamente si utilizza il formato binario, ossia $B = 2$
 - ✓ Ciascun carattere (**bit**) può assumere i valori 0 e 1
 - ✓ Se, ad esempio, $N = 8$, si possono rappresentare $2^8 = 256$ stati discreti

Principi della conversione AD

● La fase di codifica

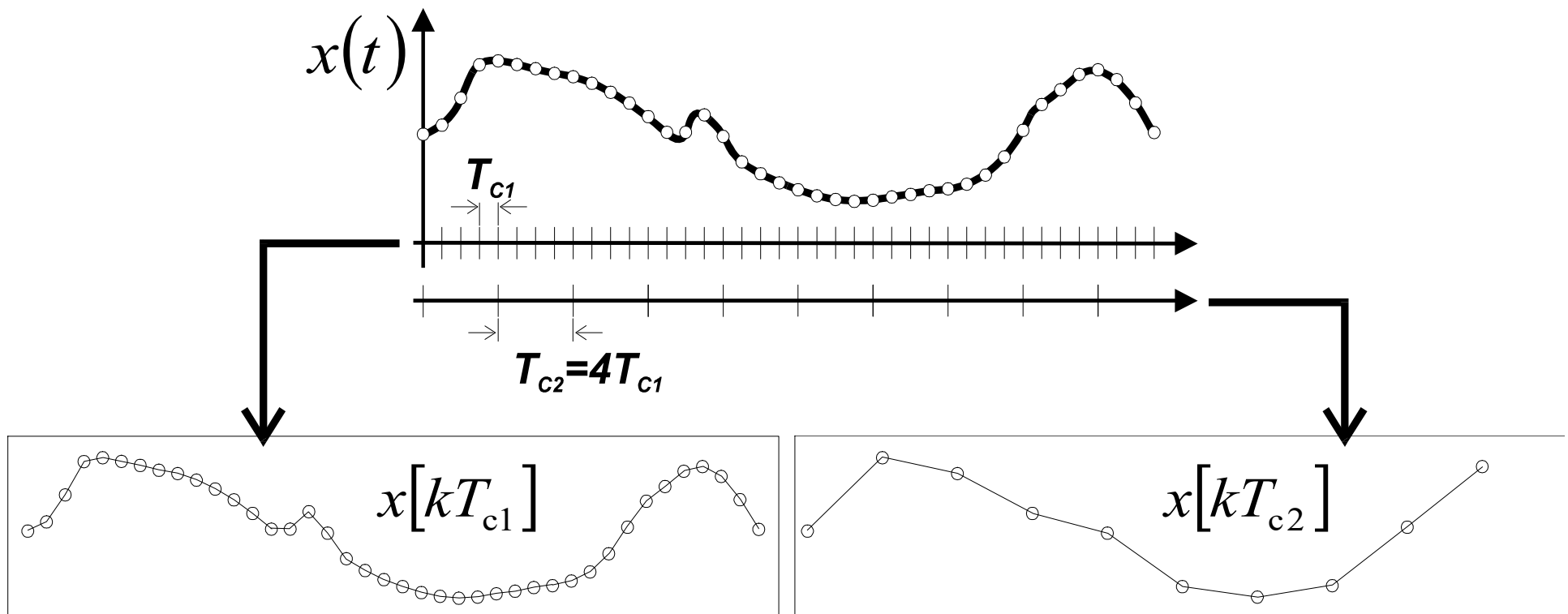
■ Codifiche binarie più diffuse

- ✓ Binario puro (campi di misura unipolari):
 - 0: **000...000**; $\approx FR$: **111...111**
- ✓ Binario con *offset* (campi di misura bipolari):
 - - $FR/2$: **000...000**; $\approx FR/2$: **111...111**
- ✓ Binario con complemento a 2 (campi bipolari):
 - - $FR/2$: **100...000**; $\approx FR/2$: **011...111**

Principi della conversione AD

● Il campionamento

- Se il campionamento non è sufficientemente “fitto”, la sequenza digitale non rappresenta “bene” il segnale analogico

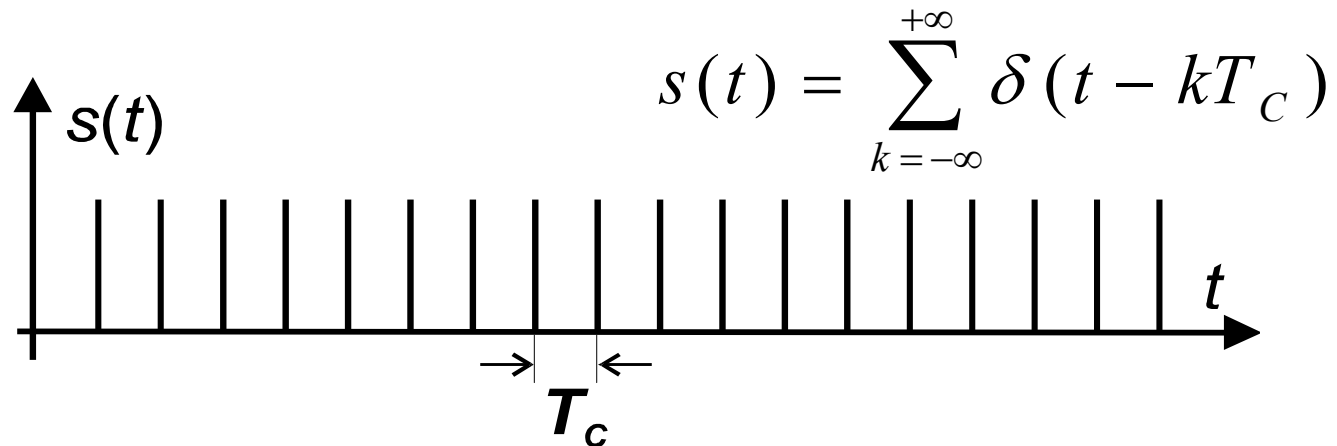


Principi della conversione AD

● Il campionamento

■ Da un punto di vista matematico

- ✓ Nel dominio del tempo, la sequenza digitale $x[kT_c]$ può essere espressa come il prodotto tra il segnale $x(t)$ ed un treno di impulsi $s(t)$ di durata infinitesima e periodo T_c

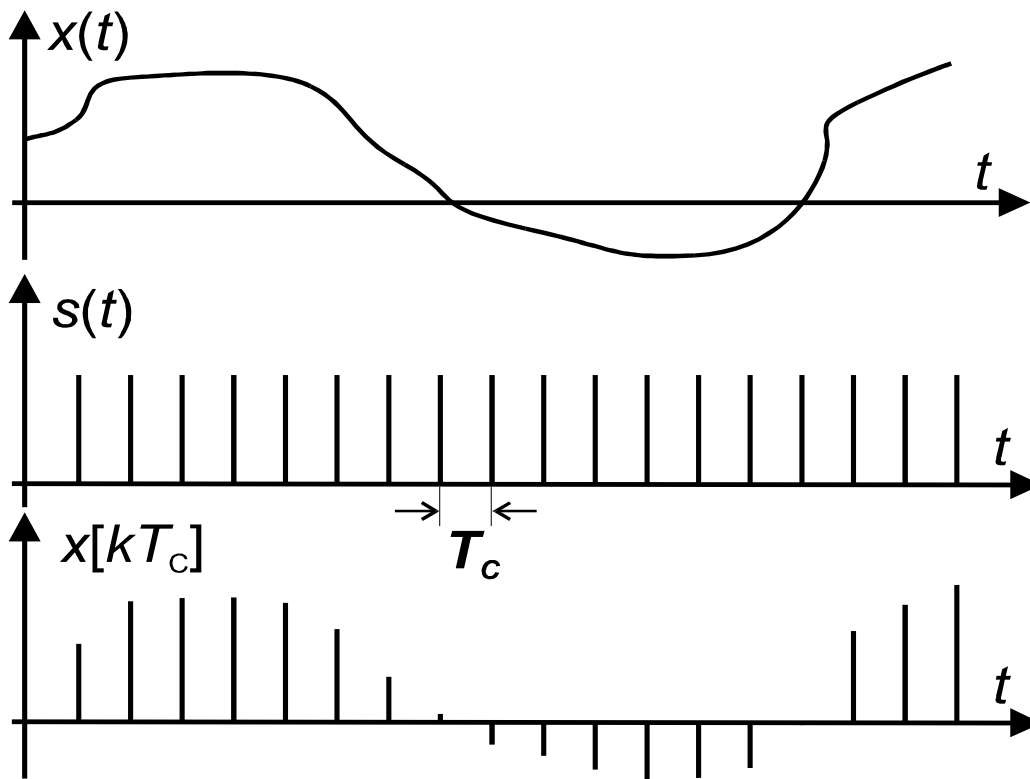


T_c è detto **periodo di campionamento**

Principi della conversione AD

● Il campionamento

■ Da un punto di vista matematico (dominio del tempo)



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

Principi della conversione AD

● Il campionamento

■ Da un punto di vista matematico

- ✓ Nel dominio della frequenza, la sequenza digitale $x[kT_C]$ può essere espressa come il prodotto di convoluzione tra le trasformate di Fourier di $x(t)$ ed $s(t)$

$$S(\omega) = \omega_c \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega - k\omega_c); \quad \omega_c = \frac{2\pi}{T_C}$$

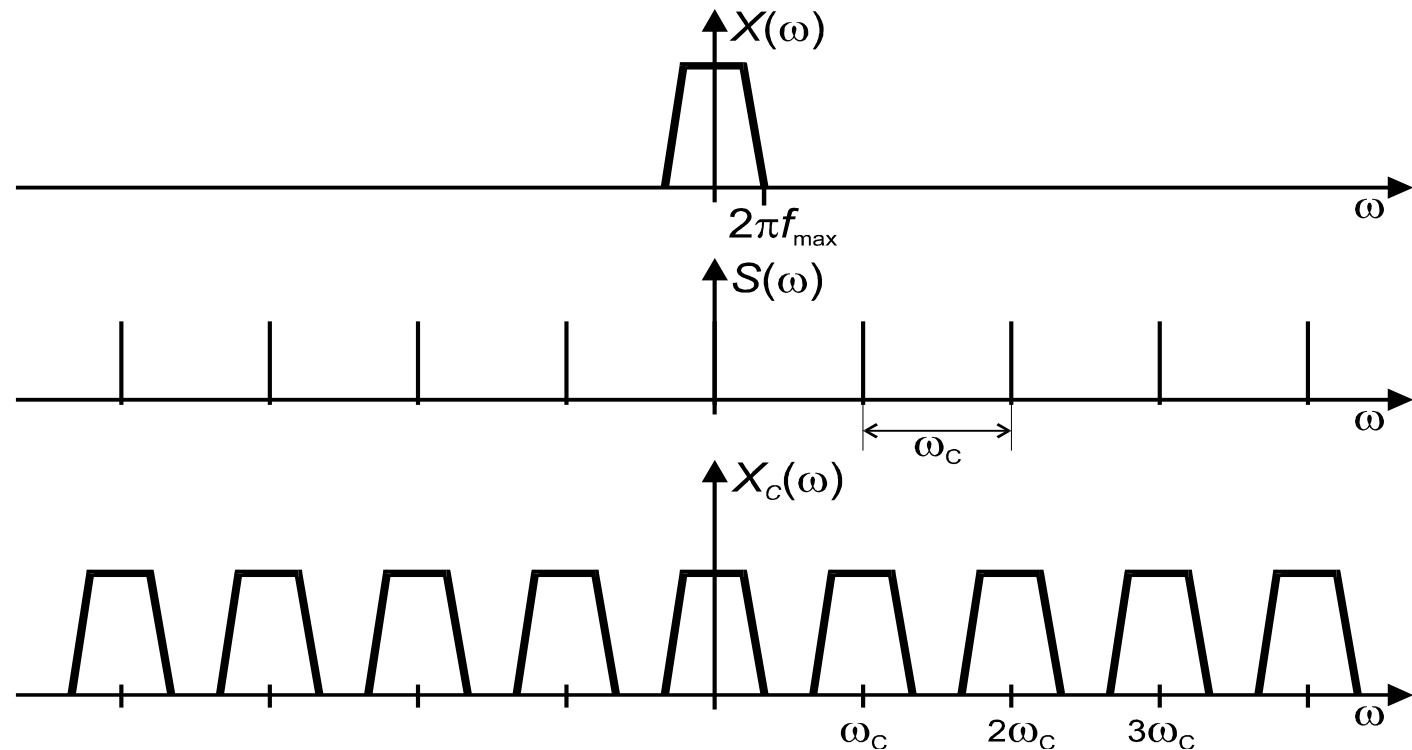
$$X_C(\omega) = X(\omega) * S(\omega) = \omega_c \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X(\omega - k\omega_c)$$

Principi della conversione AD

● Il campionamento

■ Da un punto di vista matematico

✓ IPOTESI: Segnale a banda limitata $\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$

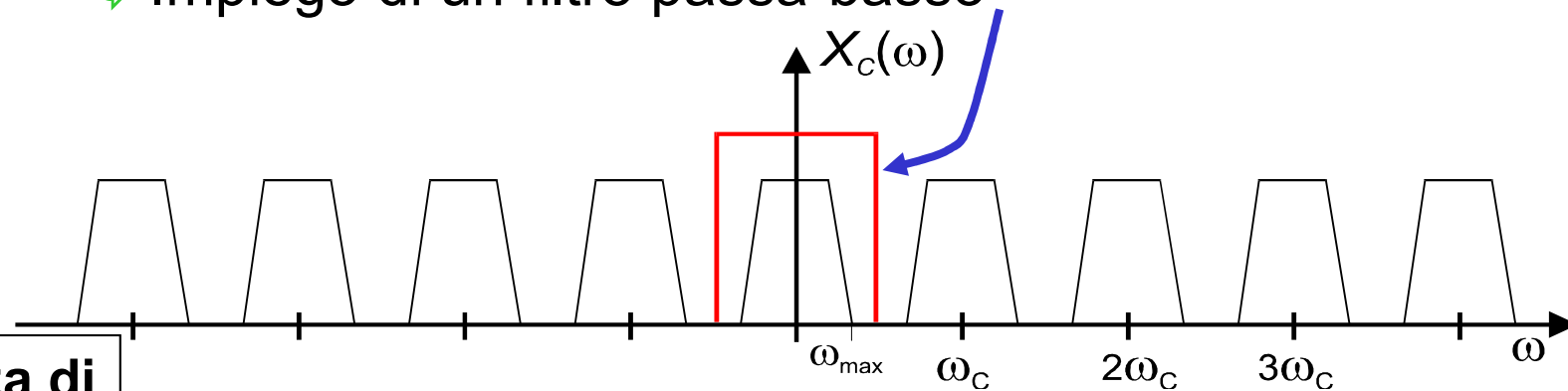


Principi della conversione AD

● Il campionamento

■ Da un punto di vista matematico

- ✓ IPOTESI: Segnale a banda limitata $\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$
- ✓ Ricostruzione del segnale analogico
 - ↪ Impiego di un filtro passa-basso



f_C è detta **frequenza di campionamento**

In linea teorica, il segnale analogico può essere ricostruito fedelmente se vale la relazione

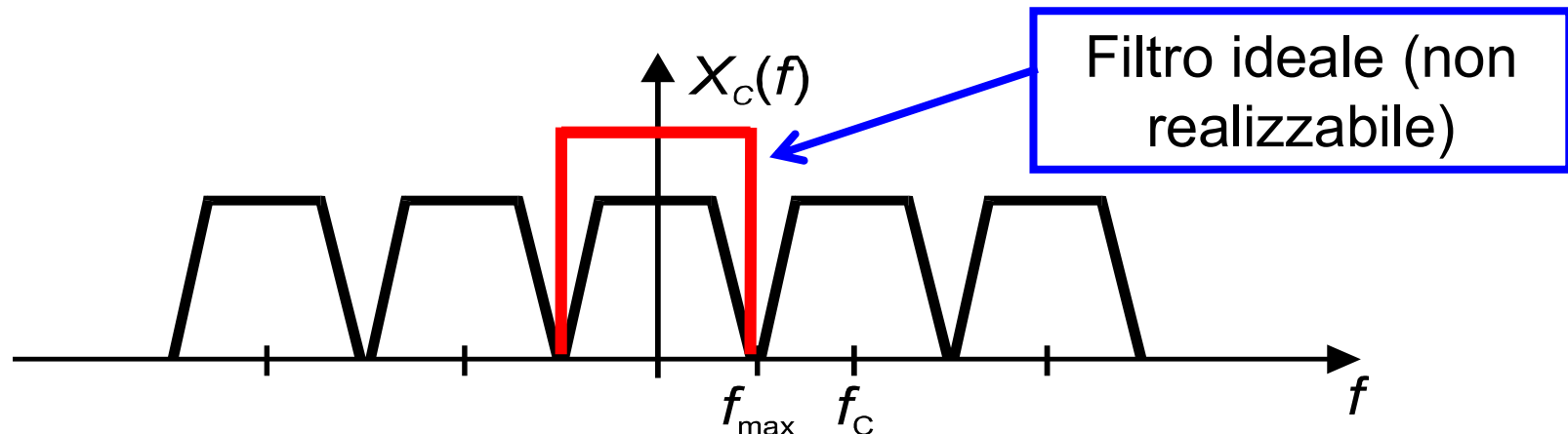
$$\omega_C \geq 2\omega_{\max} \rightarrow f_C \geq 2f_{\max}$$

Principi della conversione AD

● Il campionamento

■ Da un punto di vista matematico

- ✓ IPOTESI: Segnale a banda limitata $\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$
- ✓ La condizione $f_c \geq 2f_{\max}$ è nota come teorema di Shannon (o del campionamento)
- ✓ La condizione di uguaglianza non ha interesse pratico



Principi della conversione AD

● Il campionamento

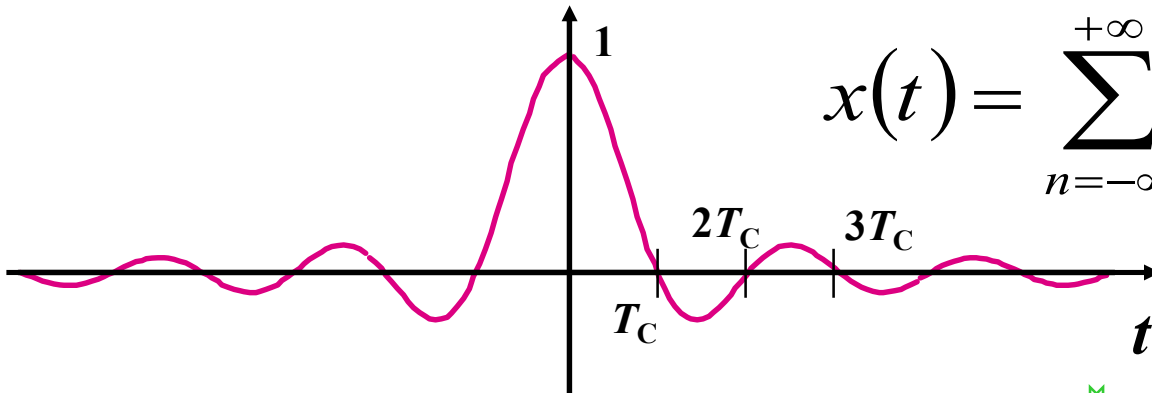
■ Da un punto di vista matematico

✓ IPOTESI: Segnale a banda limitata $\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$

✓ La condizione $f_c = 2f_{\max}$ non ha interesse pratico

↪ Nel dominio del tempo, il filtro passa-basso ideale corrisponde alla funzione **sync** ...

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_n(t) \cdot \frac{\sin[\pi f_c(t - nT_c)]}{\pi f_c(t - nT_c)}$$

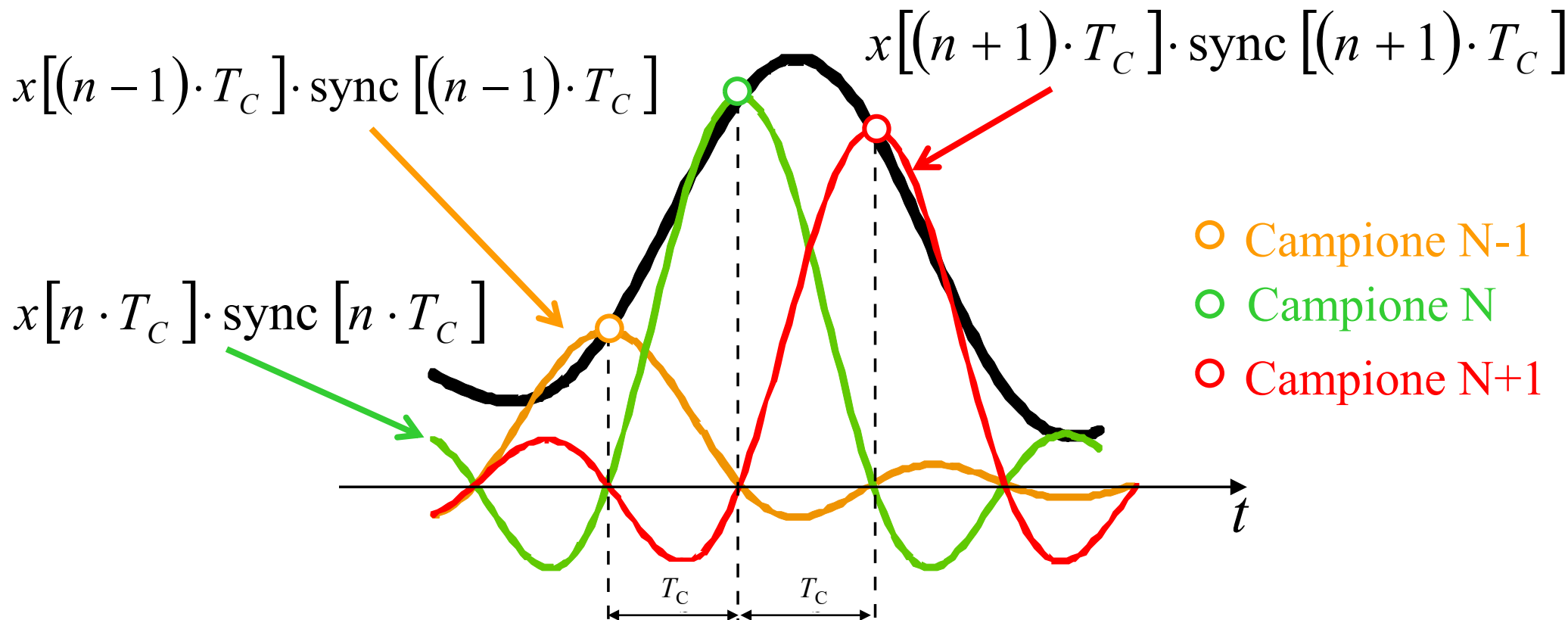


↪ ... ma non è possibile disporre di infiniti campioni

Principi della conversione AD

● Il campionamento

■ Ricostruzione del segnale tramite funzione sinc

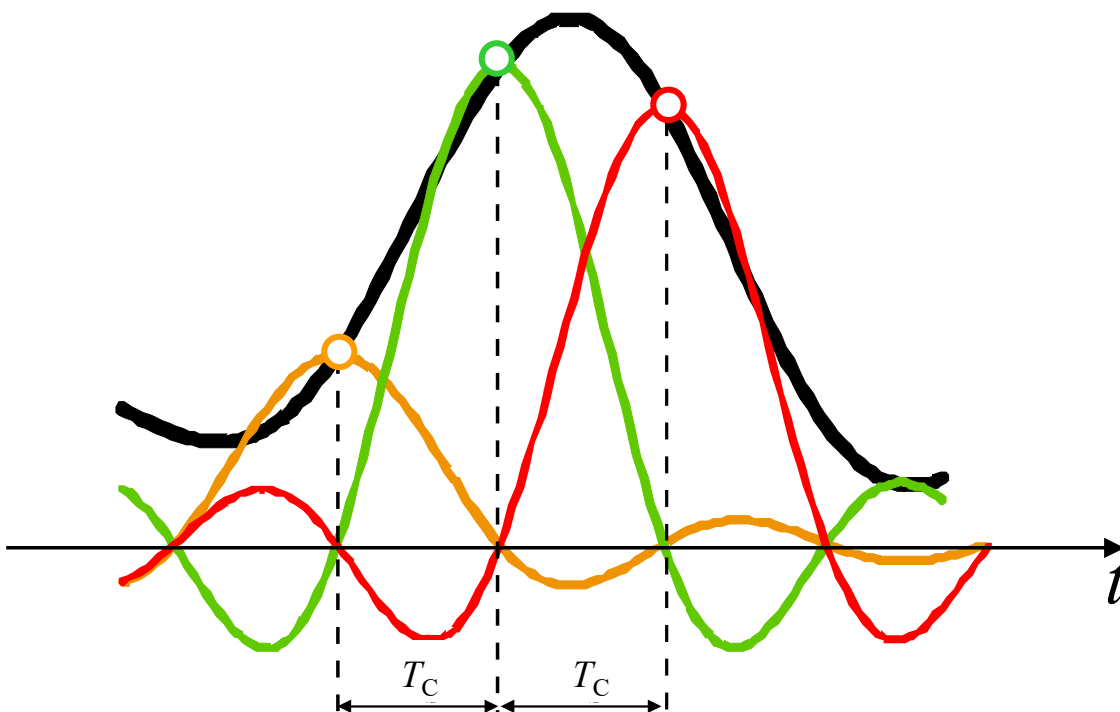


Principi della conversione AD

● Il campionamento

■ Ricostruzione del segnale tramite funzione sinc

Funzioni sinc centrate intorno agli istanti di campionamento



In ciascun istante di campionamento, tutte le funzioni sinc sono nulle, tranne quella centrata in quell'istante


↪ In ciascun istante di campionamento, il segnale ricostruito è uguale al campione in quell'istante


Principi della conversione AD


● Il campionamento

■ Da un punto di vista matematico

- ✓ IPOTESI: Segnale a banda limitata $\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$
- ✓ In pratica, la condizione per la corretta ricostruzione del segnale analogico dipende dalla tecnica di interpolazione utilizzata

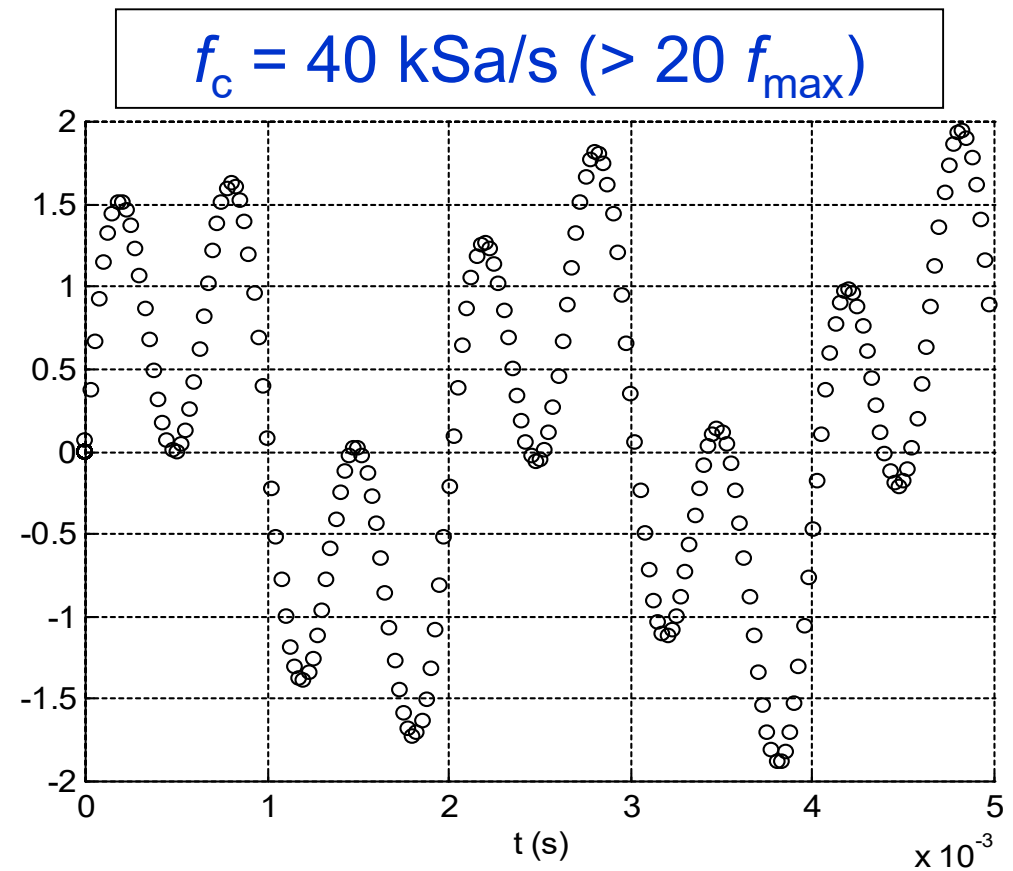
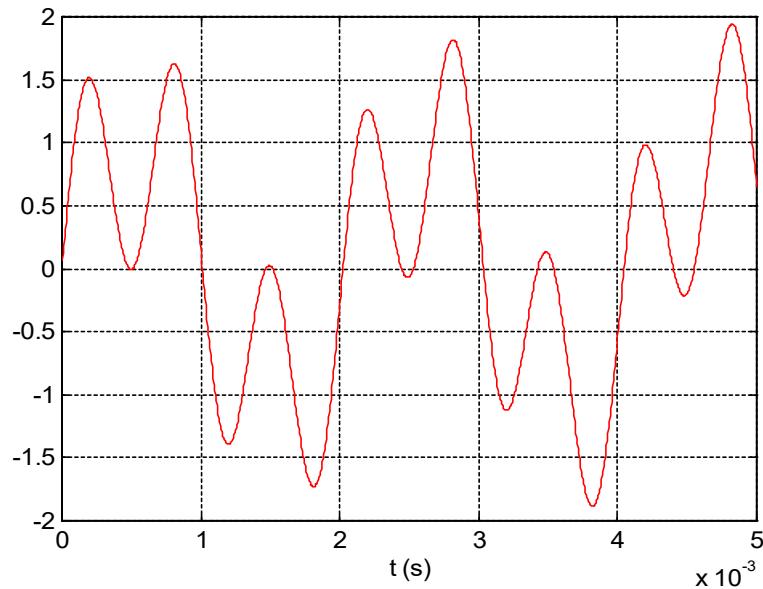
$10 > \frac{f_c}{f_{\max}} > 2.5$  Interpolazione sinc (troncata)

$20 > \frac{f_c}{f_{\max}} > 10$  Interpolazione lineare

$\frac{f_c}{f_{\max}} > 20$  Nessuna interpolazione (*dots mode*)

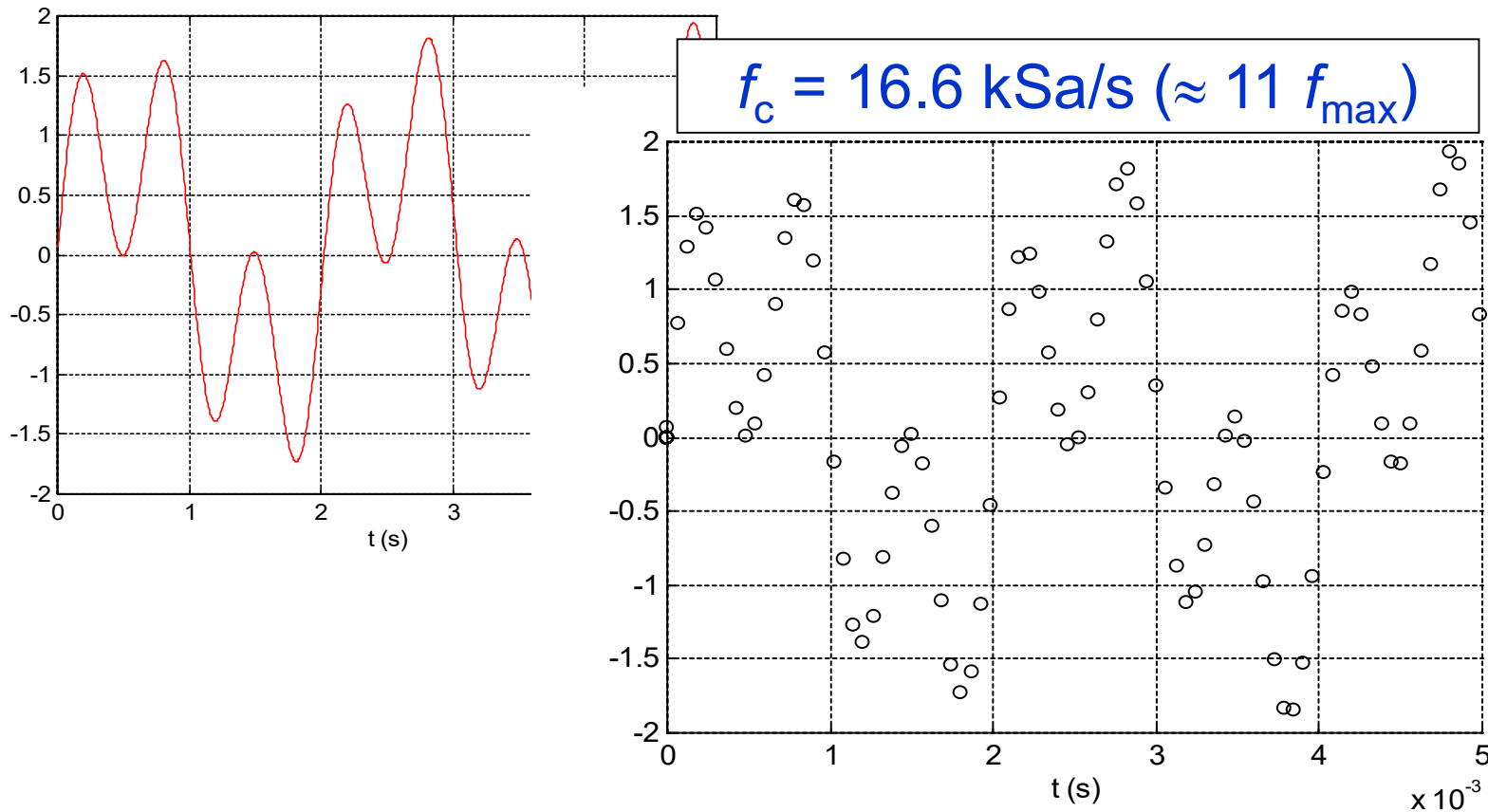
Principi della conversione AD

- Esempio: segnale con $f_{\max} = 1.5 \text{ kHz}$



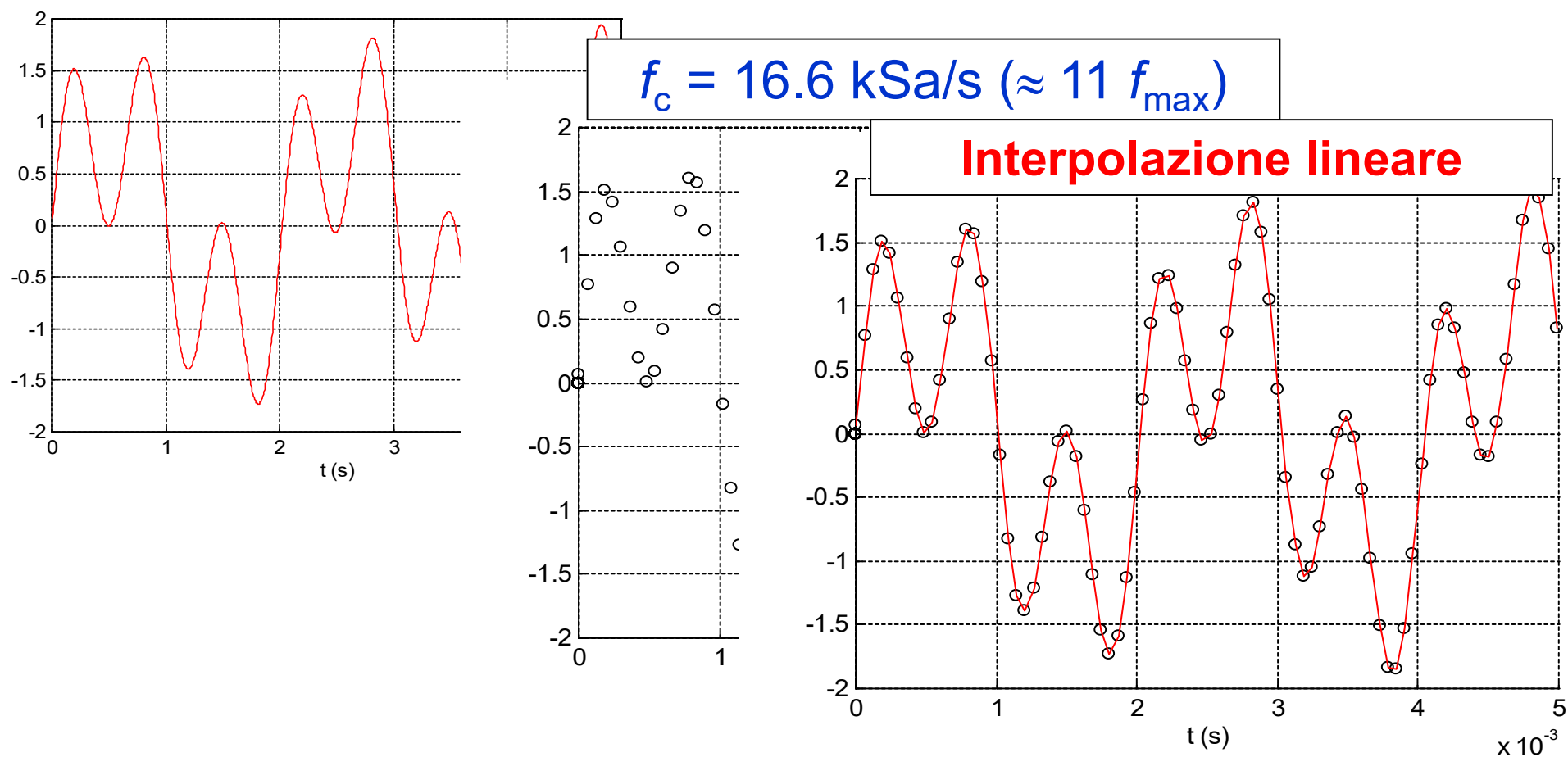
Principi della conversione AD

- Esempio: segnale con $f_{\max} = 1.5 \text{ kHz}$



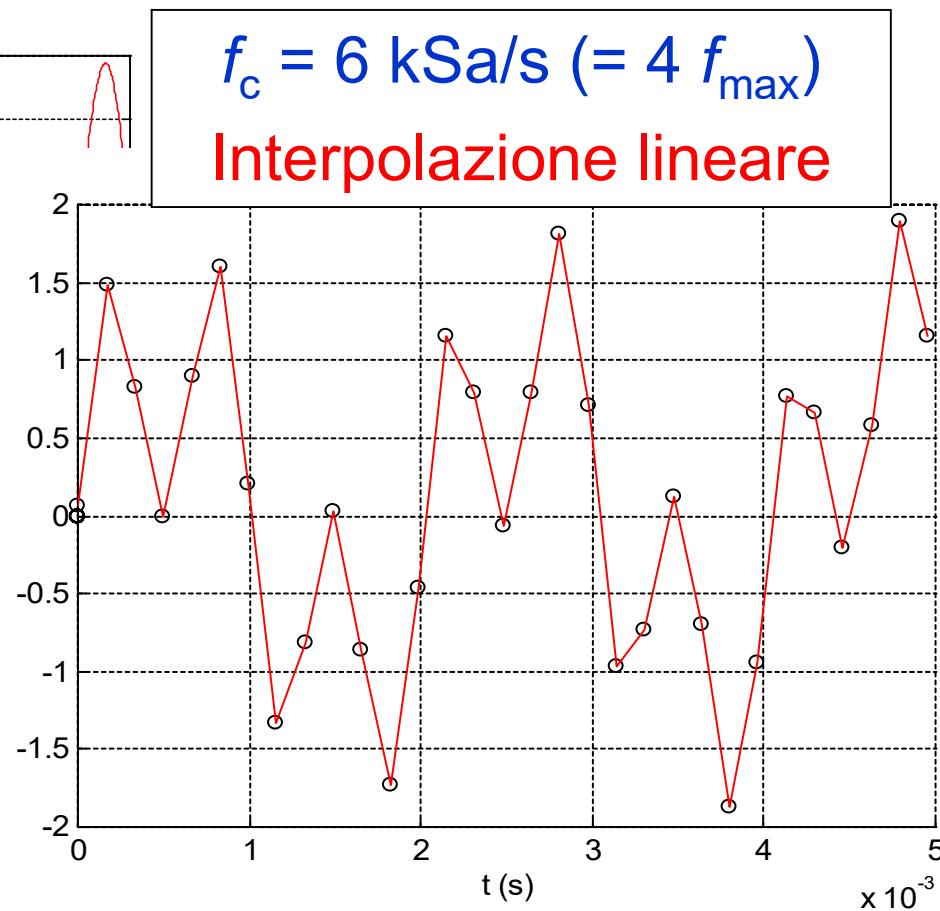
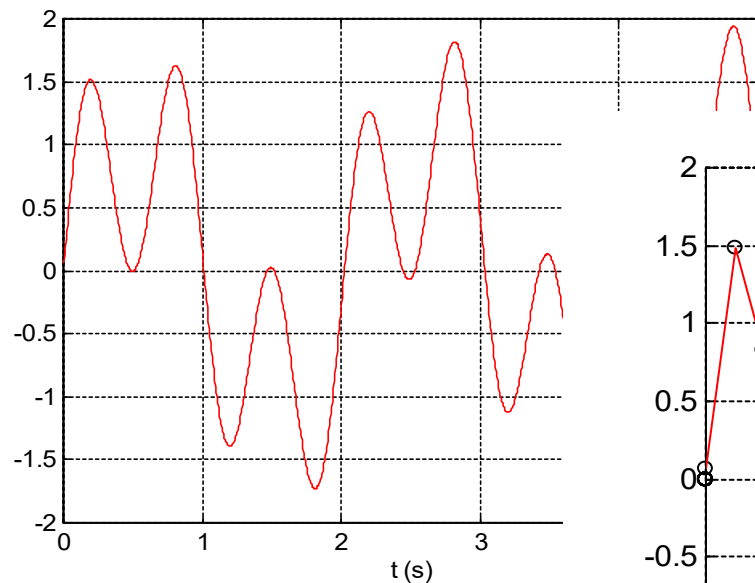
Principi della conversione AD

- Esempio: segnale con $f_{\max} = 1.5 \text{ kHz}$



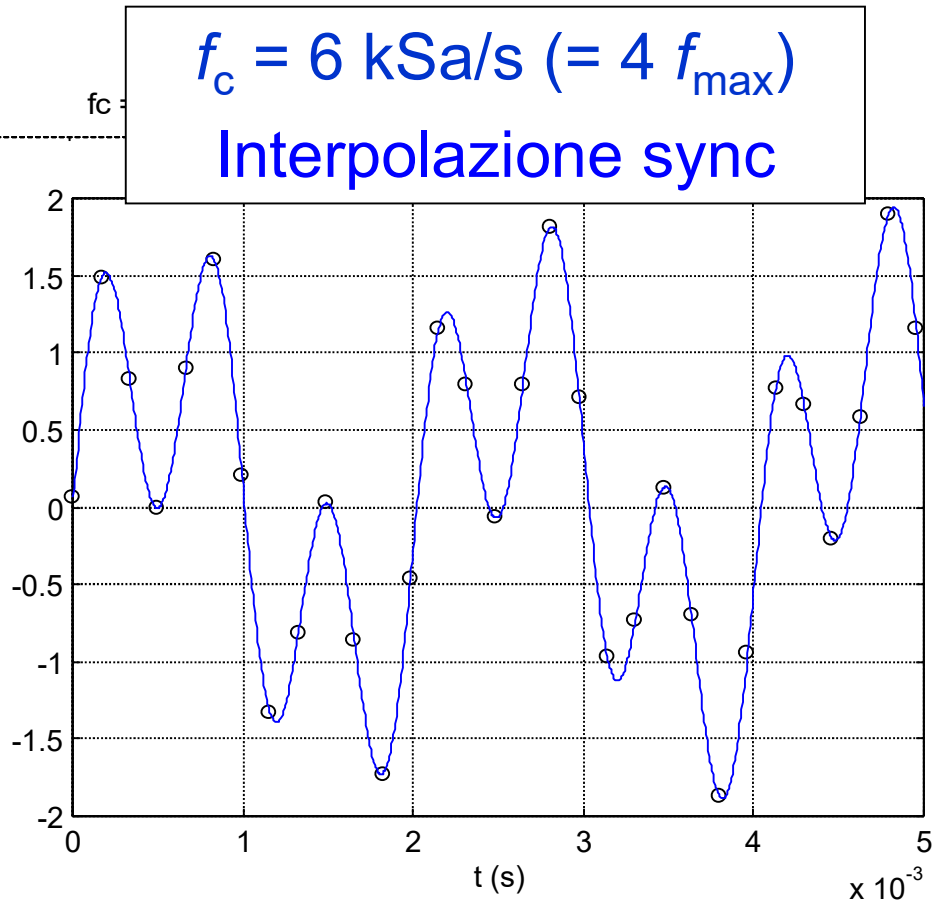
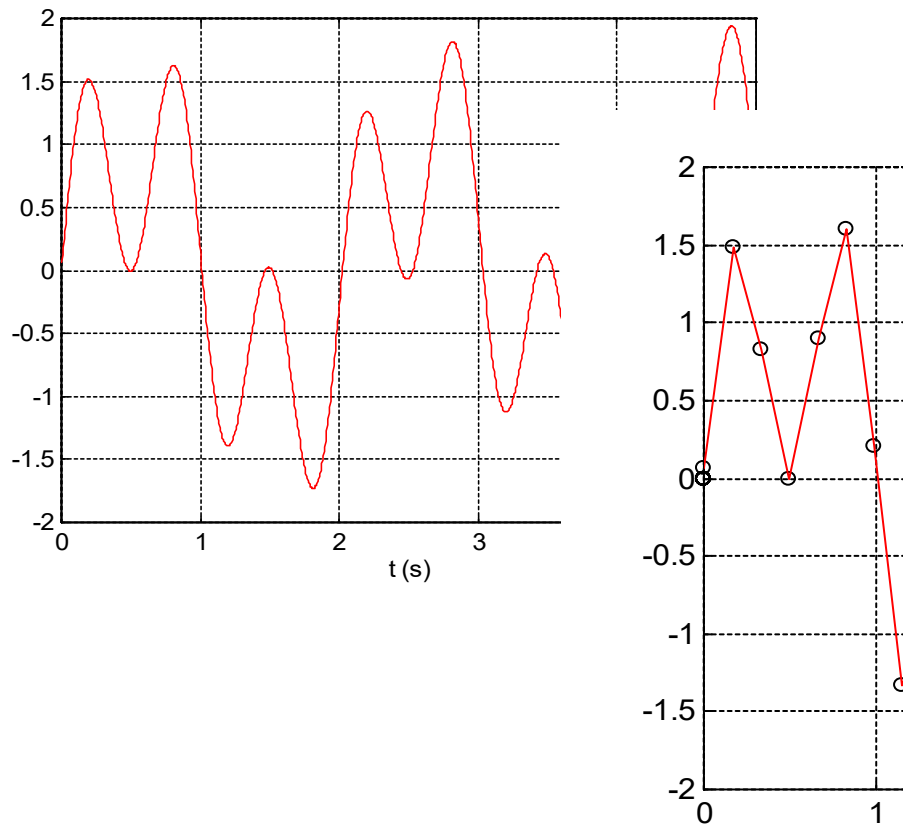
Principi della conversione AD

- Esempio: segnale con $f_{\max} = 1.5 \text{ kHz}$



Principi della conversione AD

- Esempio: segnale con $f_{\max} = 1.5 \text{ kHz}$

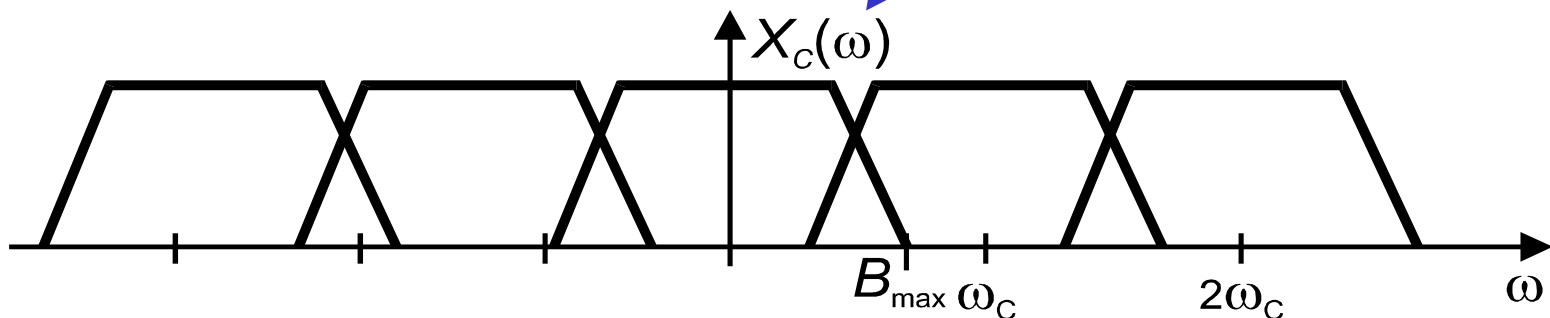


Principi della conversione AD

● Il campionamento

■ Da un punto di vista matematico

- ✓ IPOTESI: Segnale a banda limitata $\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$
- ✓ Se la condizione $f_c \geq 2f_{\max}$ non è soddisfatta
 - ↪ Non è possibile ricostruire il segnale analogico a partire dalla sequenza digitale
 - ↪ Situazione di **ALIASING**



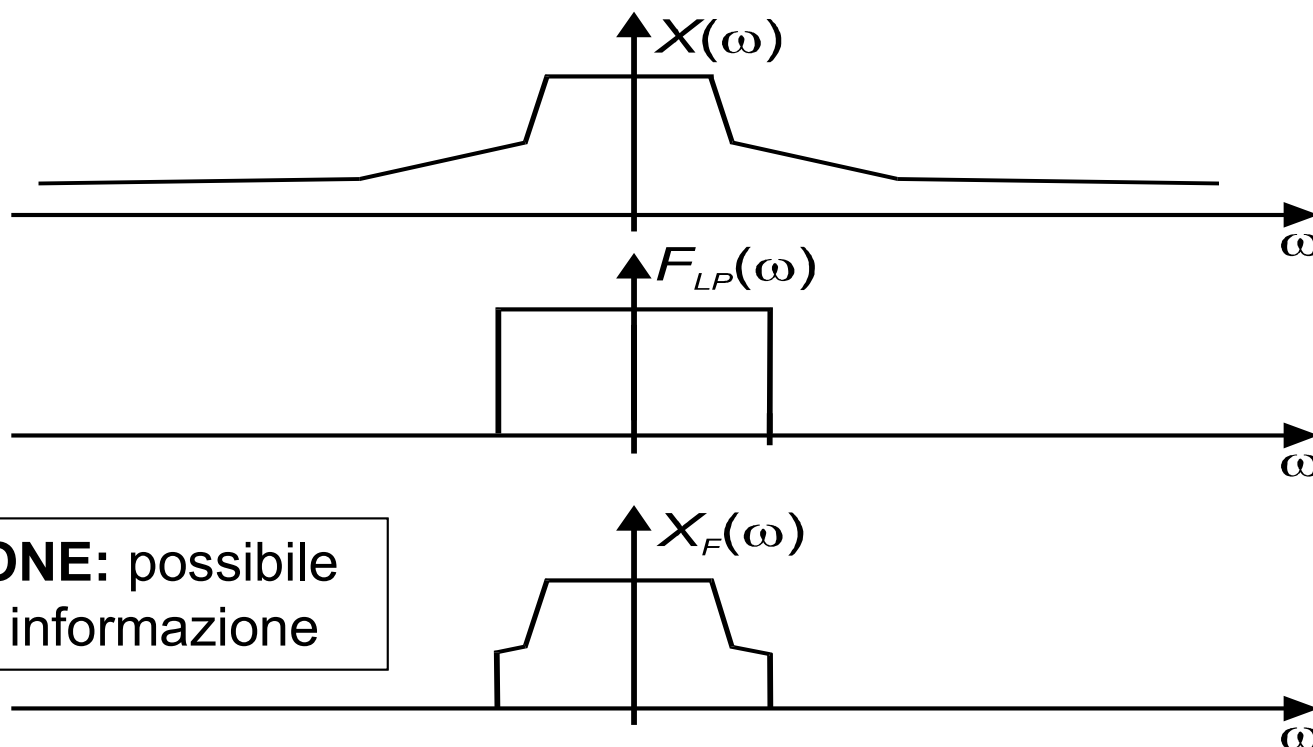
Principi della conversione AD

● Il campionamento

■ Da un punto di vista matematico

✓ Se il segnale $x(t)$ non è a banda limitata?

↘ Impiego di filtri passa-basso (**anti-aliasing**)



ATTENZIONE: possibile
perdita di informazione

Principi della conversione AD

● La quantizzazione

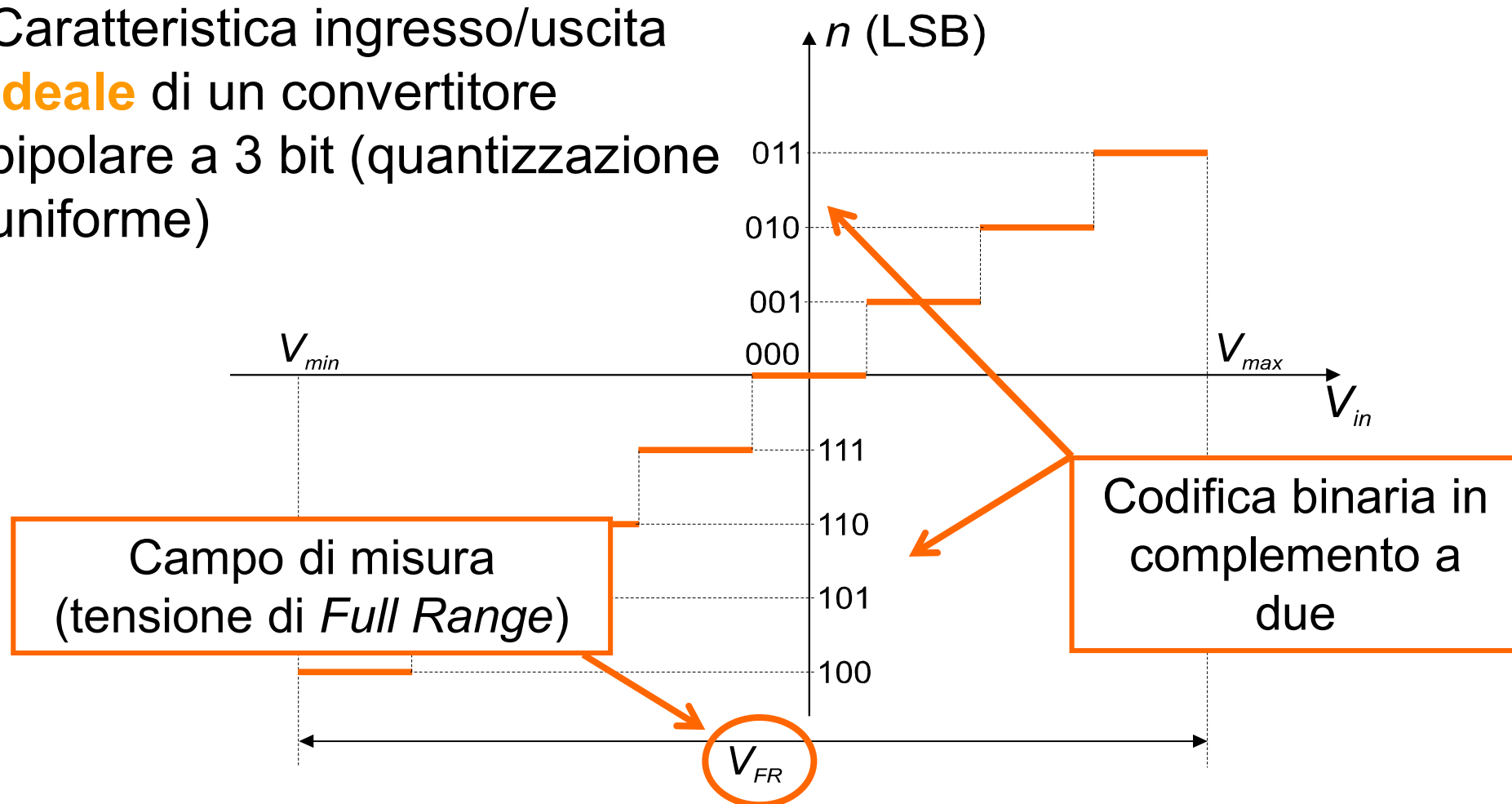
- Operazione eseguita grazie alla caratteristica ingresso/uscita di un convertitore analogico-digitale (**ADC**)



Principi della conversione AD

● La quantizzazione

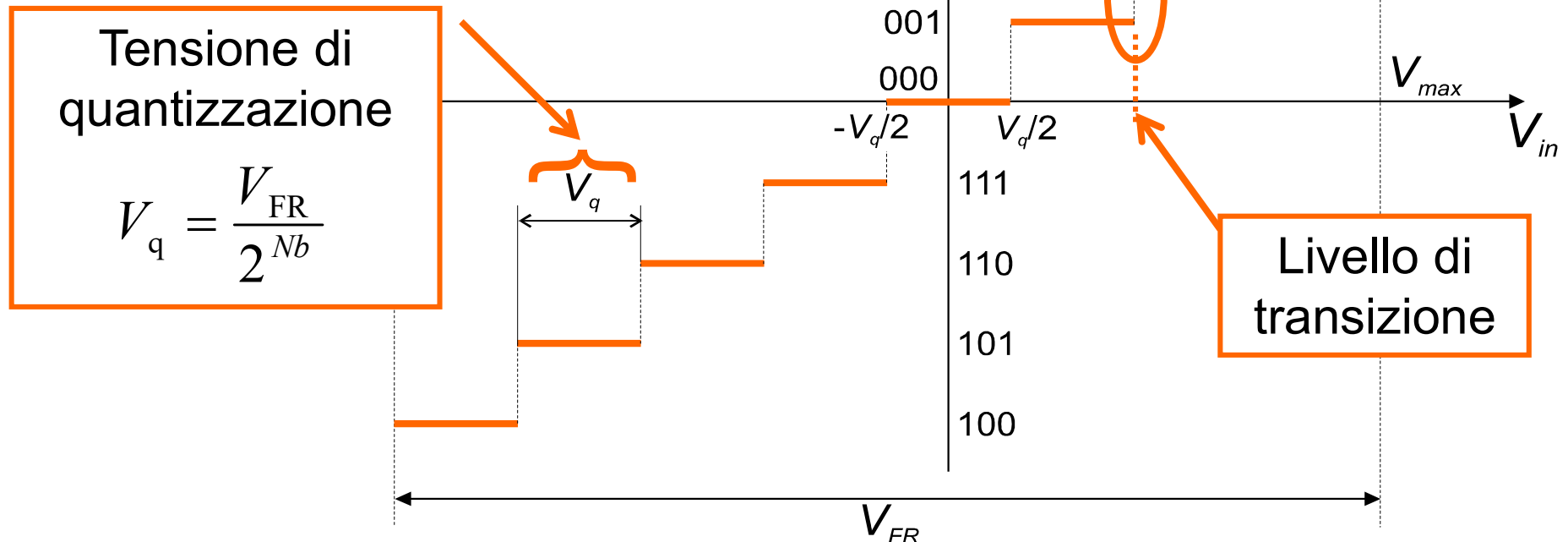
- Caratteristica ingresso/uscita **ideale** di un convertitore bipolare a 3 bit (quantizzazione uniforme)



Principi della conversione AD

● La quantizzazione

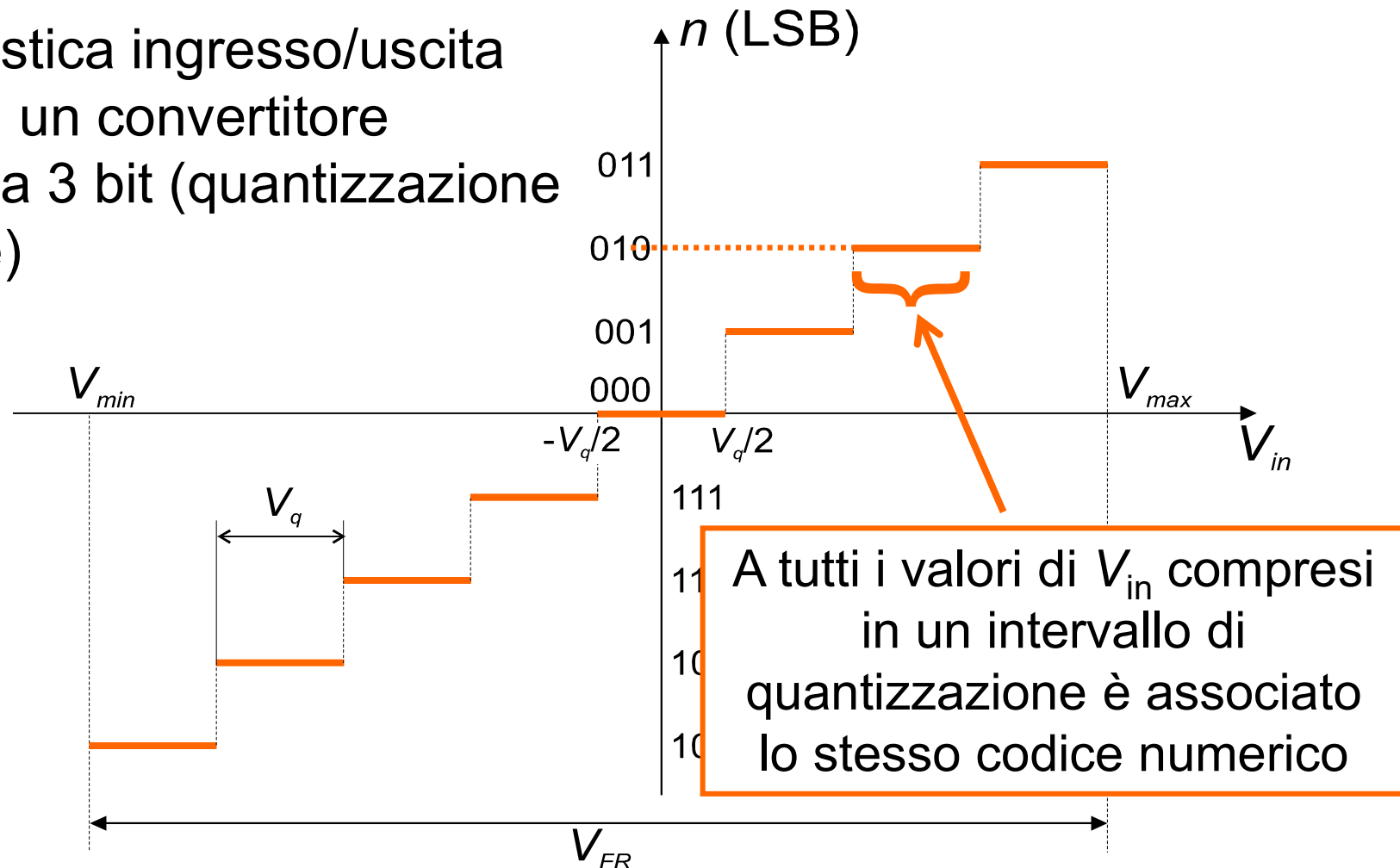
- Caratteristica ingresso/uscita **ideale** di un convertitore bipolare a 3 bit (quantizzazione uniforme)



Principi della conversione AD

● La quantizzazione

- Caratteristica ingresso/uscita **ideale** di un convertitore bipolare a 3 bit (quantizzazione uniforme)



Principi della conversione AD

● Funzione di taratura di un ADC

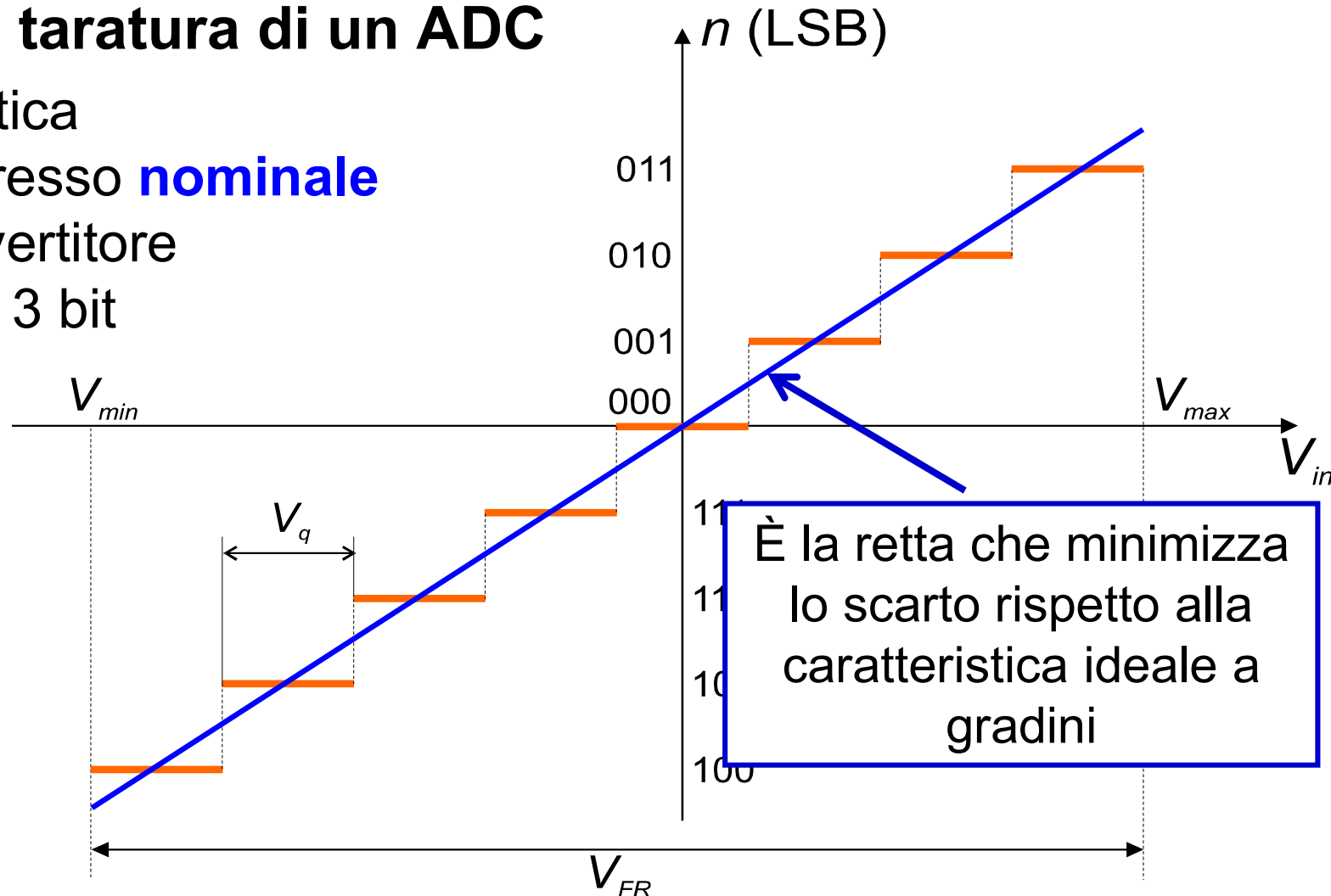
- Necessaria per risalire al valore analogico dei vari campioni a partire dai corrispondenti codici numerici
 - ☹ La caratteristica ingresso/uscita non è invertibile



Principi della conversione AD

● Funzione di taratura di un ADC

- Caratteristica uscita/ingresso **nominale** di un convertitore bipolare a 3 bit



Principi della conversione AD

● Funzione di taratura di un ADC

- Caratteristica uscita/ingresso **nominale** di un convertitore bipolare a 3 bit

$$\hat{V}_{\text{in}} = f^{-1}(n) = n \cdot V_q$$

Esempio

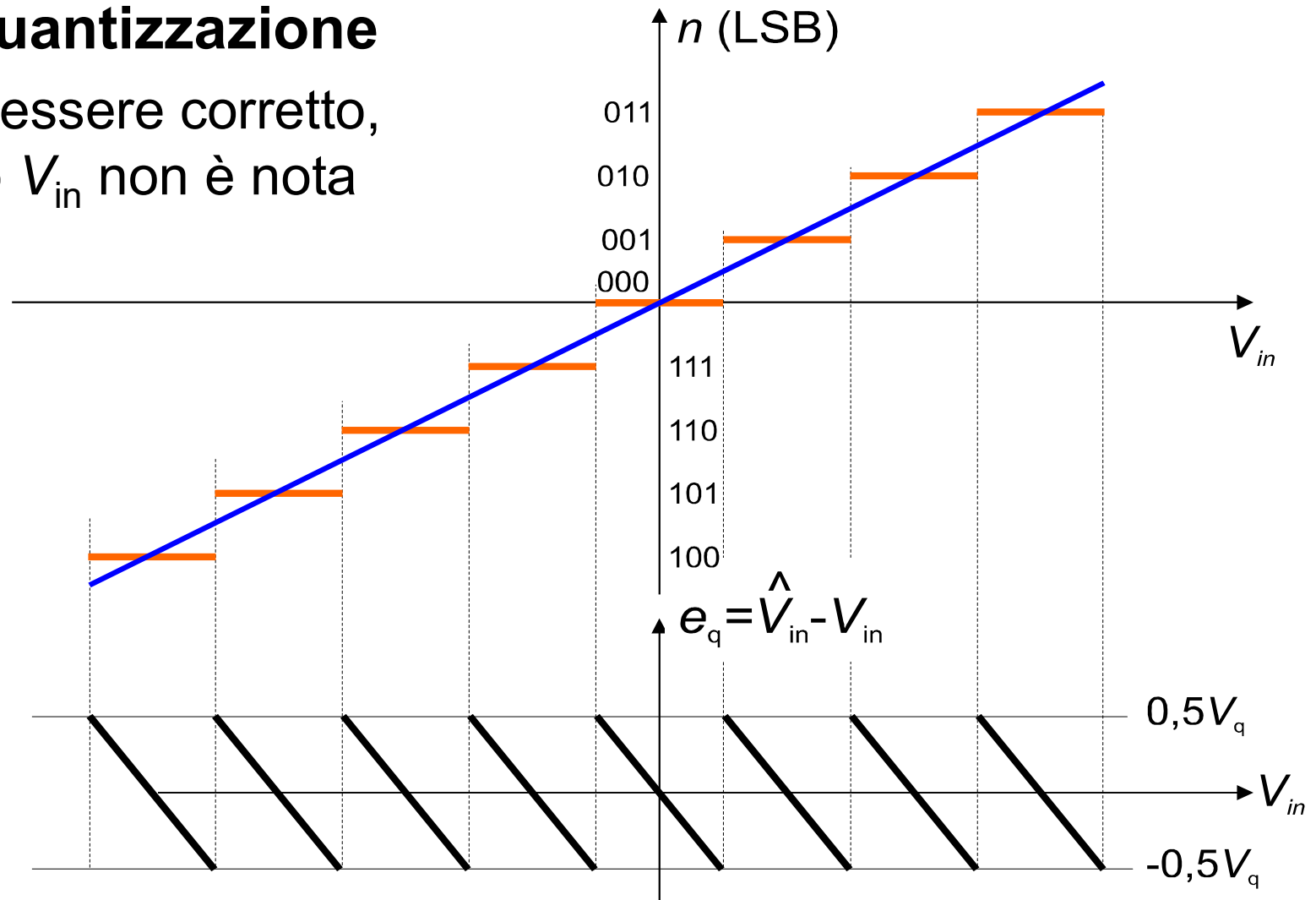
- $V_{\text{FR}} = 5 \text{ V}; N_b = 8 \Rightarrow V_q = 0.0195 \text{ V}$
- $n = -53$

↪ tensione di ingresso stimata: - 1.035 V

Principi della conversione AD

● Errore di quantizzazione

- Non può essere corretto, in quanto V_{in} non è nota



Principi della conversione AD

● Errore di quantizzazione

- Rappresenta un contributo di incertezza (di quantizzazione)

- ✓ Modello deterministico

$$\Rightarrow \delta e_q = 0.5 \cdot V_q$$

- ✓ Modello probabilistico

$$\Rightarrow u(e_q) = \frac{0.5 \cdot V_q}{\sqrt{3}}$$

Esempio: $V_{FR} = 5 \text{ V}$

- $N_b = 4 \Rightarrow V_q = 0.3125 \text{ V}; \delta e_q \approx 156 \text{ mV}$
- $N_b = 8 \Rightarrow V_q = 0.0195 \text{ V}; \delta e_q \approx 9.8 \text{ mV}$

Principi della conversione AD

● Errore di quantizzazione

- L'incertezza di quantizzazione è, in valore assoluto, costante su tutto il campo di misura

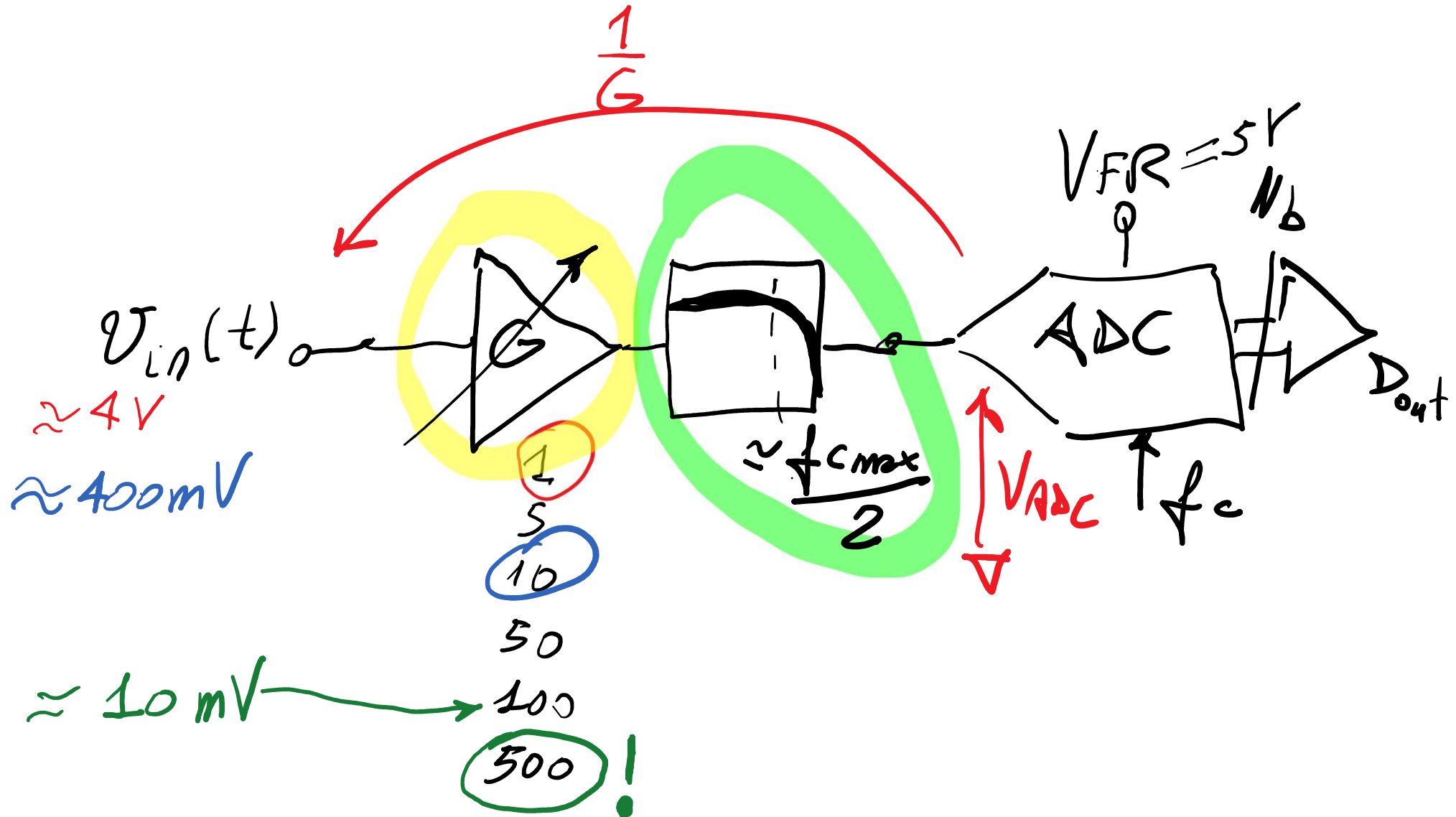
✓ L'incertezza relativa aumenta al diminuire di V_{in}

$$\varepsilon e_q = \frac{\delta e_q}{V_{in}} = \frac{0.5 \cdot V_q}{V_{in}}$$

Conviene lavorare il più possibile vicino alla portata del convertitore

Esempio: $V_{FR} = 5 \text{ V}$; $N_b = 8$; $\delta e_q \approx 9.8 \text{ mV}$

- $V_{in} = 4 \text{ V} \Rightarrow \varepsilon e_{q\%} \approx 0.24 \%$
- $V_{in} = 0.1 \text{ V} \Rightarrow \varepsilon e_{q\%} \approx 9.8 \%$
- $V_{in} = 0.01 \text{ V} \Rightarrow \varepsilon e_{q\%} \approx 98 \%$!!!



Principi della conversione AD

● Tempo di conversione

- Intervallo di tempo che intercorre tra l'istante in cui si preleva un campione del segnale e l'istante in cui il codice numerico associato al campione è disponibile all'uscita del convertitore

ATTENZIONE

Durante il tempo di conversione, il segnale all'ingresso del convertitore deve rimanere costante

In pratica, NON deve cambiare di una quantità superiore a $\pm \frac{1}{2} V_q$

Principi della conversione AD

● Tempo di conversione

- Pone un limite alla massima frequenza del segnale da convertire (indipendentemente dal teorema del campionamento)

Esempio

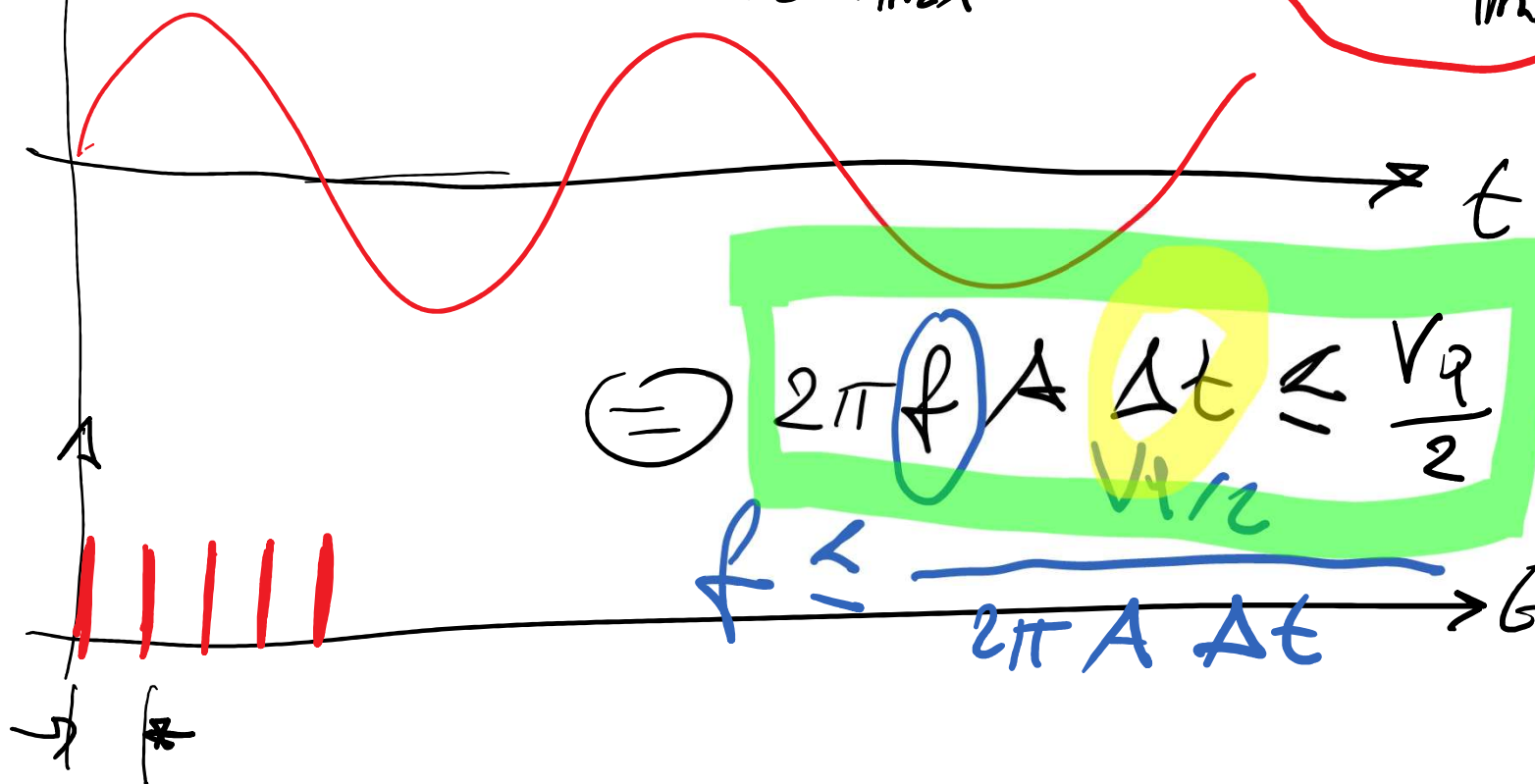
Convertitore con tempo di conversione $\Delta t = 10 \mu\text{s}$,
Full Range: 10 V, $Nb = 12$ bit ($V_q \approx 2.5 \text{ mV}$)

Conversione di un segnale sinusoidale

$$v(t) = A \sin(\omega t); A = 5 \text{ V}; \omega = 2\pi f$$

Imponendo $\Delta v_{MAX} \leq 1.25 \text{ mV}$ nell'intervallo Δt ,
si ottiene $f_{MAX} \leq 4 \text{ Hz!!!}$

$$\Delta V_{mx} = \left. \frac{dV(t)}{dt} \right|_{mx} \cdot \Delta t = \omega A \cos(\omega t) \Big|_{mx} \cdot \Delta t \quad (\Rightarrow)$$



$$(\Rightarrow) 2\pi f A \Delta t \leq \frac{V_q}{2}$$

$$f \leq \frac{V_q}{2\pi A \Delta t}$$

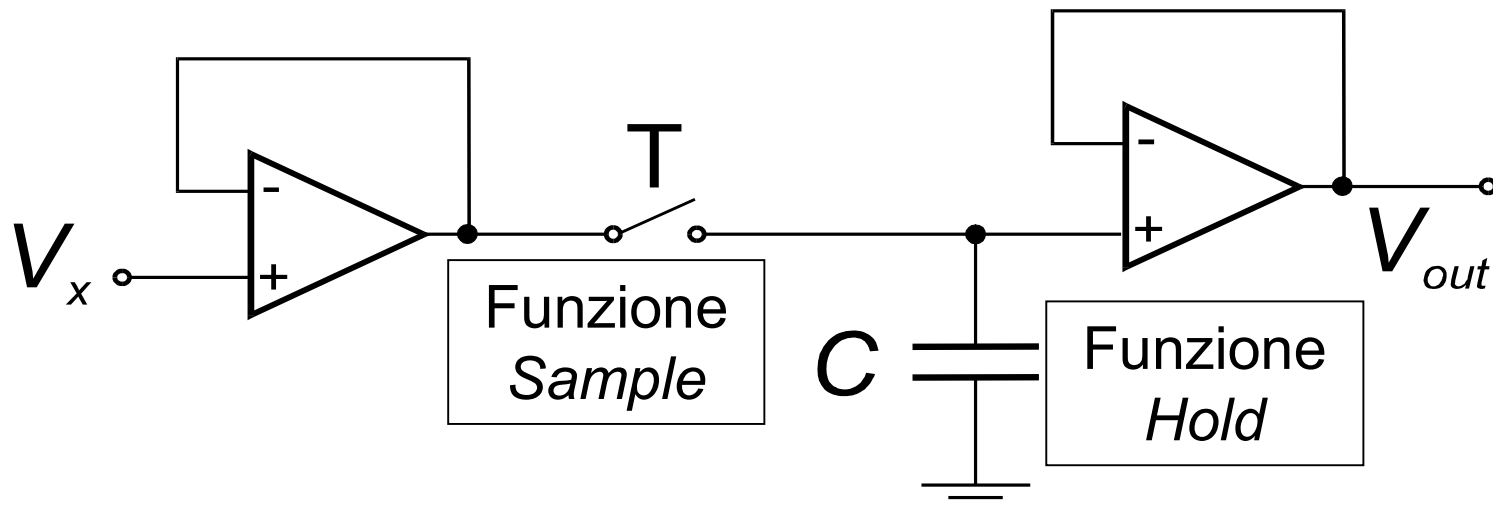
$$\Delta t \geq 10\mu s$$

$$f_c = \frac{1}{10^{-5}} = 10^5 \text{ KHz} \Rightarrow f_{mx} \approx 40 \text{ KHz}$$

Principi della conversione AD

● Tempo di conversione

- Per garantire che i campioni da convertire si mantengano entro $\pm \frac{1}{2} V_q$ durante il tempo di conversione, si ricorre ad un circuito di *Sample-and-Hold* (solitamente interno al convertitore)



Principi della conversione AD

- **Tempo di conversione**

- Impiego del circuito di *Sample-and-Hold*

Esempio

ADC con tempo di conversione $\Delta t = 10 \mu\text{s}$,

Full Range: 10 V, $Nb = 12$ bit ($V_q \approx 2.5$ mV)

Conversione di un segnale sinusoidale

$$v(t) = A \sin(\omega t); A = 5 \text{ V}; \omega = 2\pi f; f = 10 \text{ kHz}$$

Tempo di carica del condensatore:

$$\Delta t_c = \frac{1/2 \text{ LSB}}{2\pi f A} \approx 4 \text{ ns}$$

Tempo di scarica maggiore di $10 \mu\text{s}$



Convertitori analogico/digitale (ADC)

Convertitori analogico/digitale

● **Caratteristica di trasferimento reale**

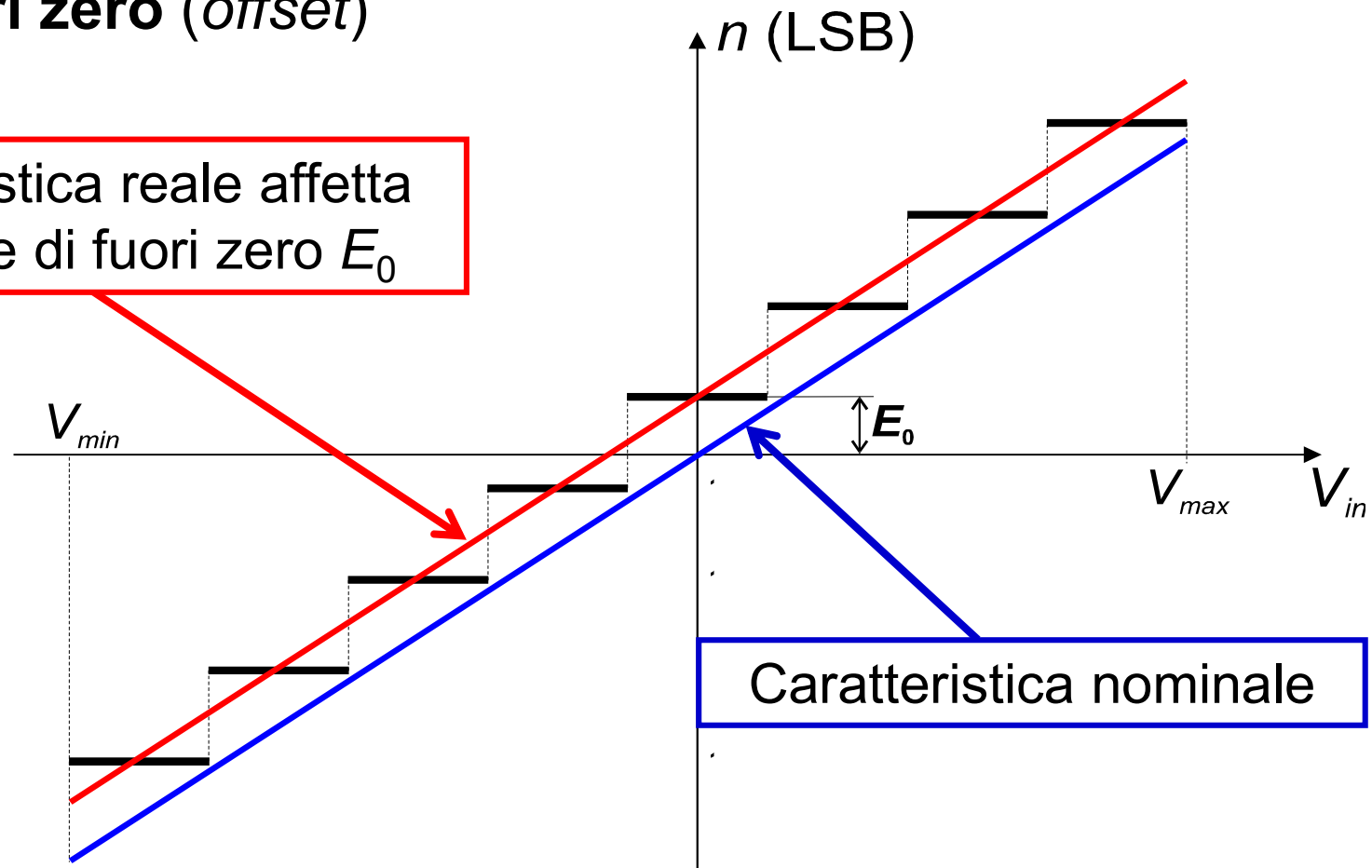
- Le non idealità che influenzano la caratteristica ingresso/uscita reale di un convertitore analogico/digitale sono classificate in:
 - ✓ Errore di fuori zero
 - ✓ Errore di guadagno
 - ✓ Errore di linearità

Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento reale

■ Errore di fuori zero (*offset*)

Caratteristica reale affetta da errore di fuori zero E_0

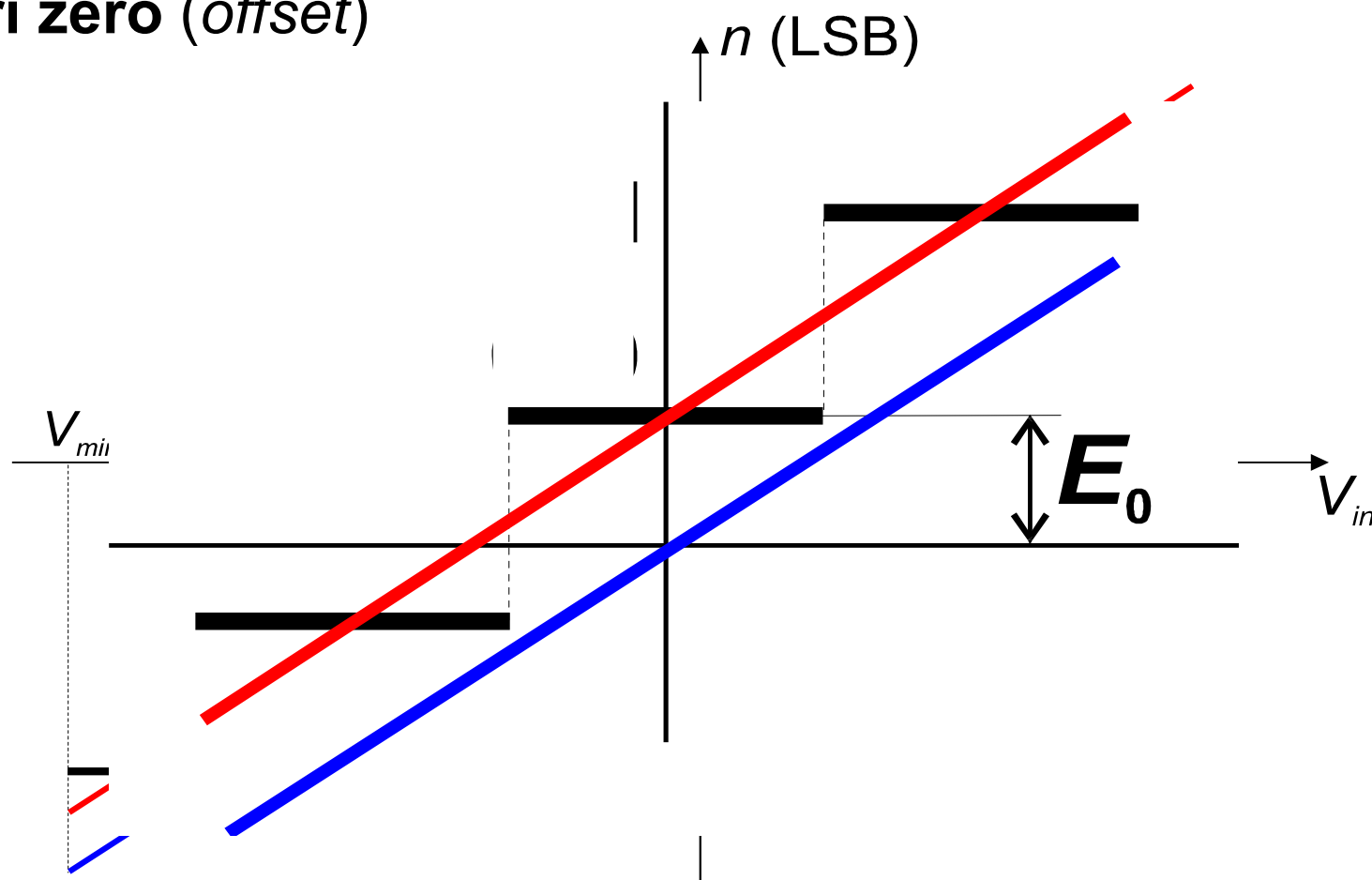


Caratteristica nominale

Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento reale

■ Errore di fuori zero (*offset*)



Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento reale

■ Errore di fuori zero (*offset*)

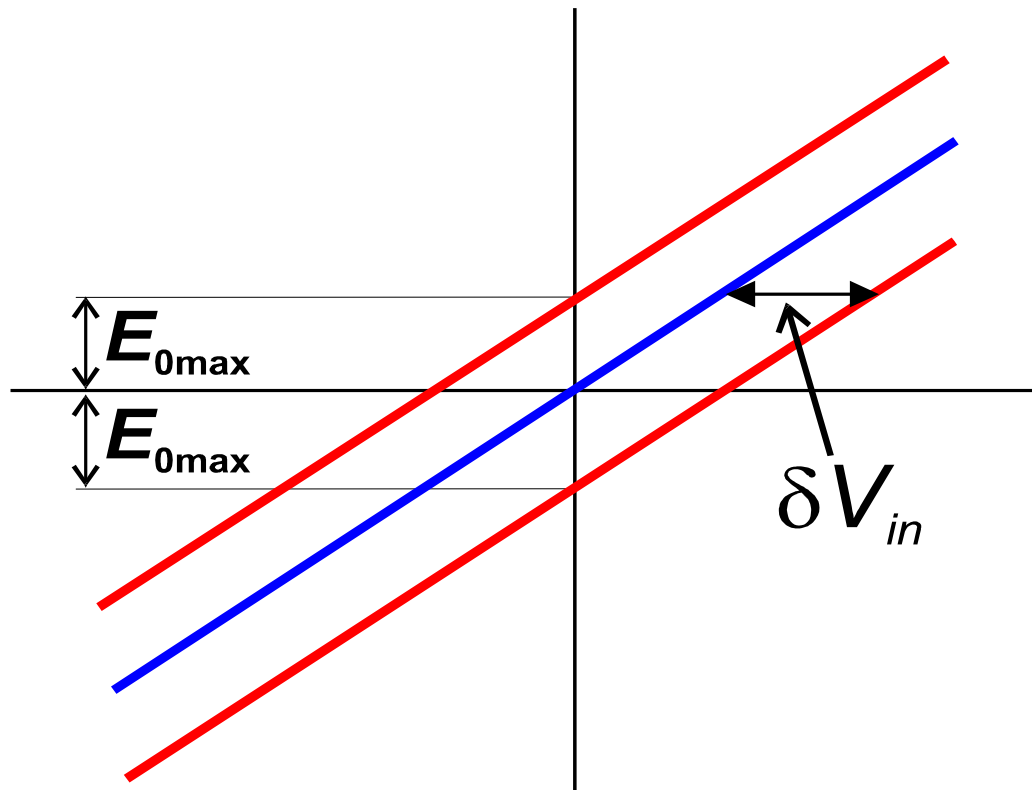
- ✓ Il costruttore fornisce solitamente l'errore di fuori zero espresso in LSB nella forma $\pm E_{0\max}$
 - ↳ Massimo errore di fuori zero ammesso per tutti i dispositivi dello stesso tipo
- ✓ Incertezza corrispondente (modello deterministico):

$$\delta V_{in}^{E_0} = E_{0\max} \cdot V_q$$

Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento reale

■ Errore di fuori zero (*offset*)



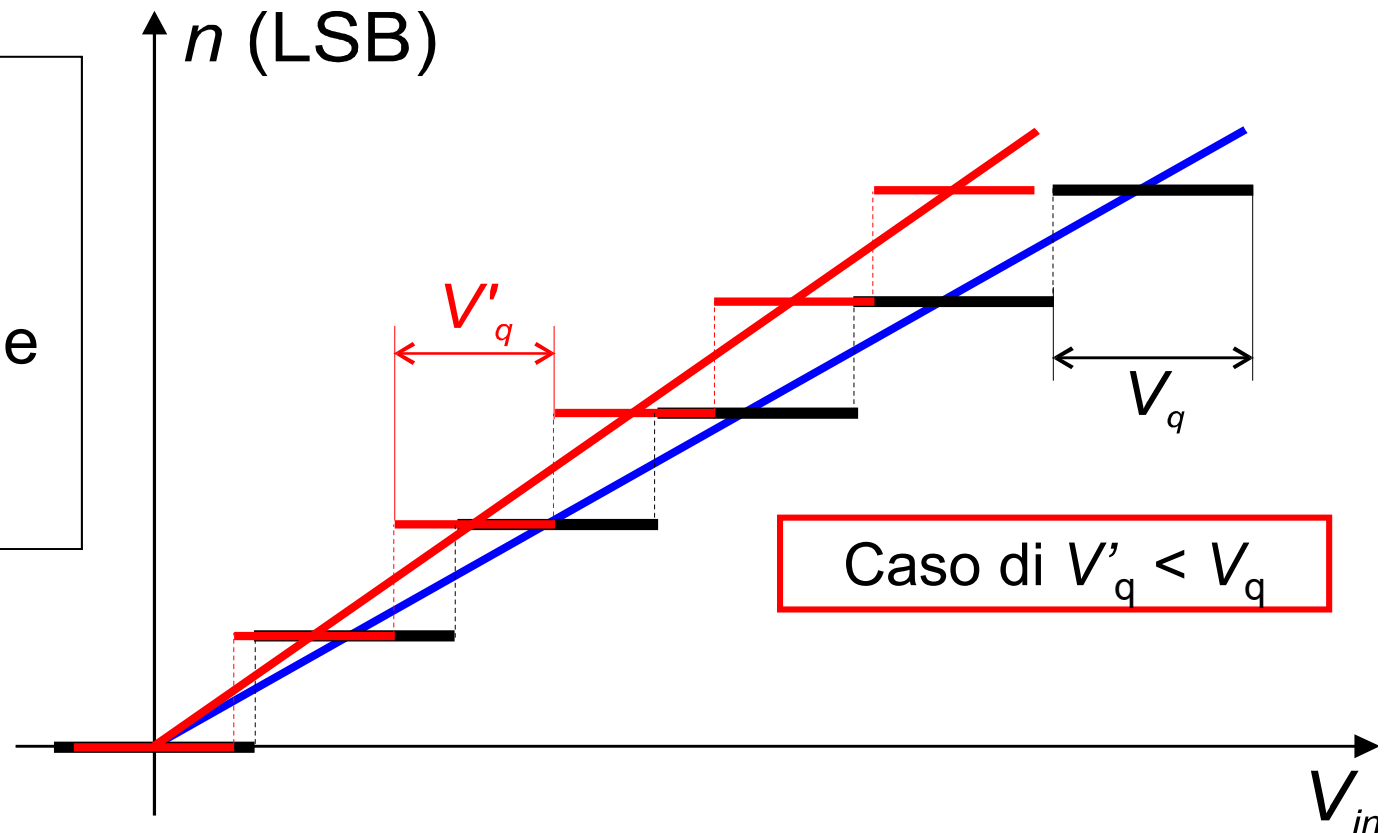
Incertezza assoluta
costante su tutto il
campo di misura

Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento reale

■ Errore di guadagno

È dovuto alla differenza tra l'intervallo di quantizzazione reale (V'_q) e quello nominale (V_q)

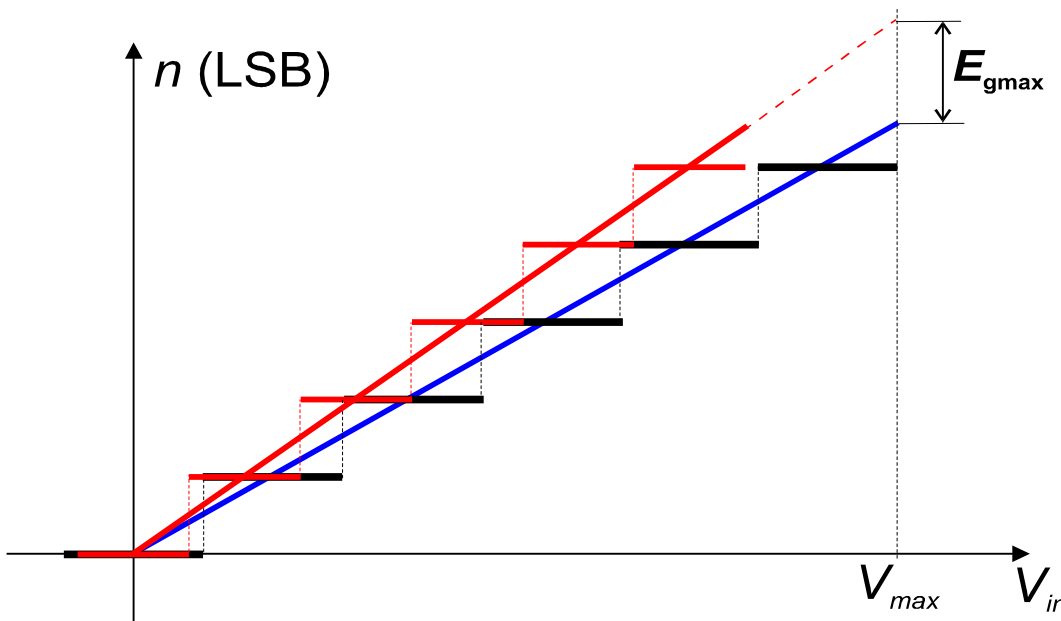


Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento reale

■ Errore di guadagno

- ✓ Il costruttore fornisce solitamente l'errore di guadagno valutato all'estremo del campo di misura ed espresso in LSB nella forma $\pm E_{gmax}$



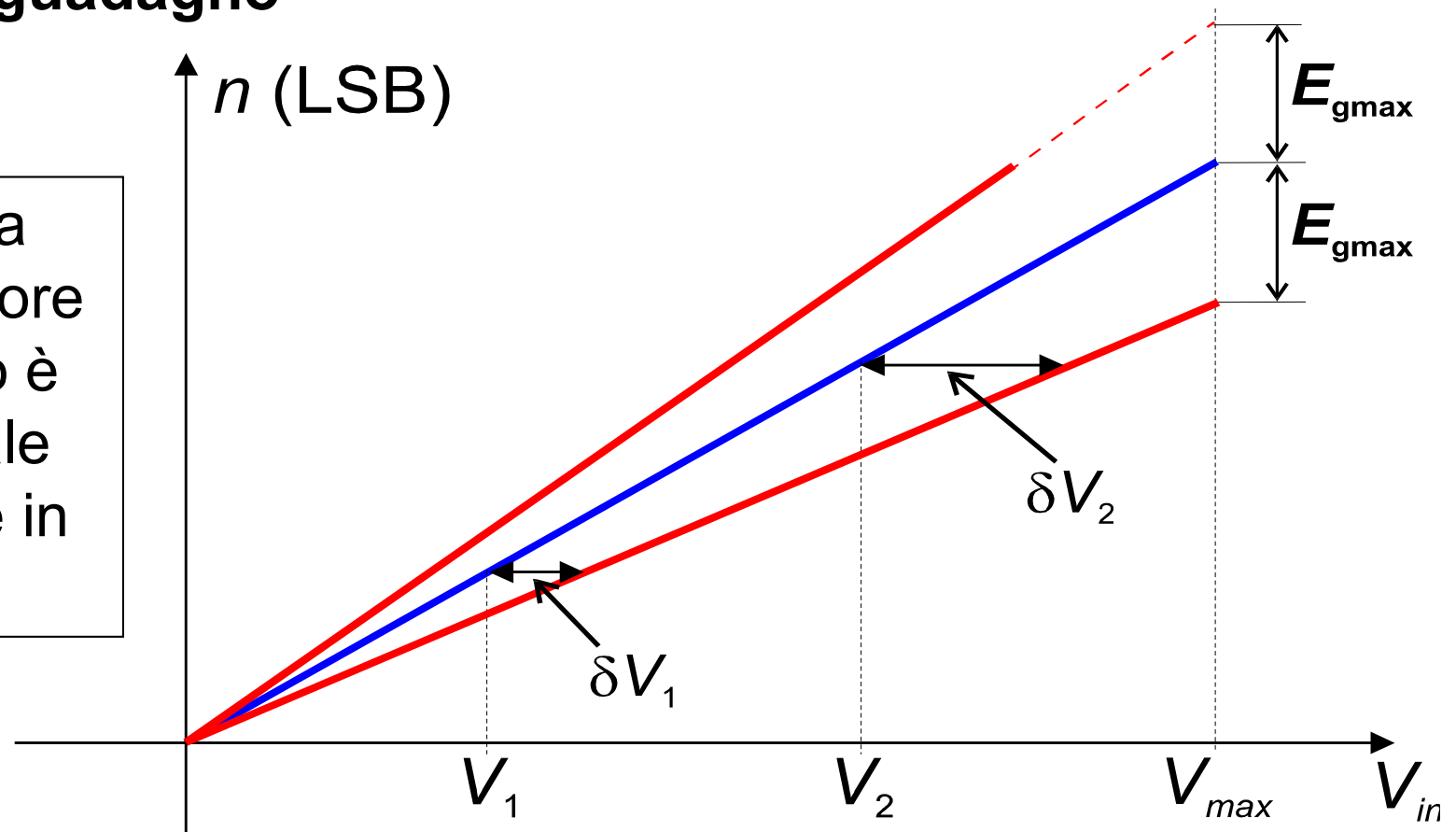
⇒ Massimo errore di guadagno ammesso per tutti i dispositivi dello stesso tipo

Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento reale

■ Errore di guadagno

L'incertezza dovuta all'errore di guadagno è proporzionale alle tensione in misura



Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento reale

■ Errore di guadagno

✓ Incertezza corrispondente (modello deterministico):

↳ Campo di misura unipolare

$$\delta V_{\text{in}}^{E_g} = E_{\text{gmax}} \cdot \frac{n}{2^{Nb}} \cdot V_q$$

↳ Campo di misura bipolare

$$\delta V_{\text{in}}^{E_g} = E_{\text{gmax}} \cdot \frac{n}{2^{Nb-1}} \cdot V_q$$

Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento

■ Errore di linearità

- ✓ È dovuto alla non uniformità degli intervalli di quantizzazione
- ✓ È espresso mediante due parametri:
 - Errore di linearità integrale E_I
 - Errore di linearità differenziale E_D

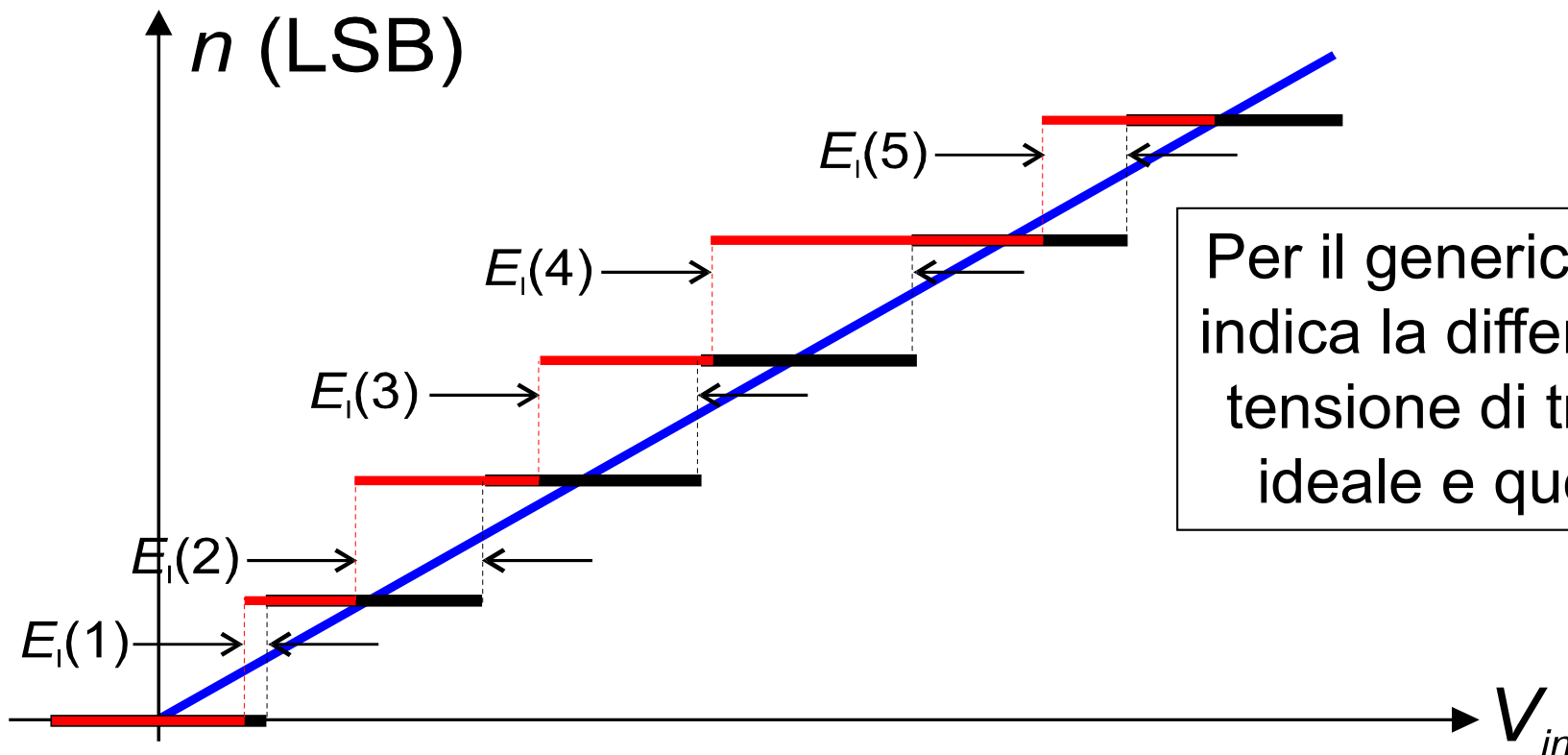
NOTA

- Non si tratta di due contributi di incertezza differenti
- Nelle misure assolute di tensione si utilizza E_I , mentre E_D deve essere considerato nel caso di metodi basati sul trasferimento della riferibilità

Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento

■ Errore di linearità integrale



Per il generico codice k ,
indica la differenza tra la
tensione di transizione
ideale e quella reale

Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento reale

■ Errore di linearità integrale

- ✓ Il costruttore fornisce solitamente l'errore di linearità integrale espresso in LSB nella forma $\pm E_{\text{Imax}}$
 - ↳ Massimo errore di linearità integrale per tutti i dispositivi dello stesso tipo
- ✓ Incertezza corrispondente (modello deterministico):

$$\delta V_{in}^{E_I} = E_{\text{Imax}} \cdot V_q$$

Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento reale

■ Errore di linearità differenziale

- ✓ Indica la differenza tra l'intervallo di quantizzazione reale associato al generico codice k e la tensione di quantizzazione ideale V_q
- ✓ È generalmente espresso in forma relativa rispetto alla tensione di quantizzazione ideale:

$$E_D(k) = \frac{A(k) - V_q}{V_q}$$

Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento reale

■ Errore di linearità differenziale

vs

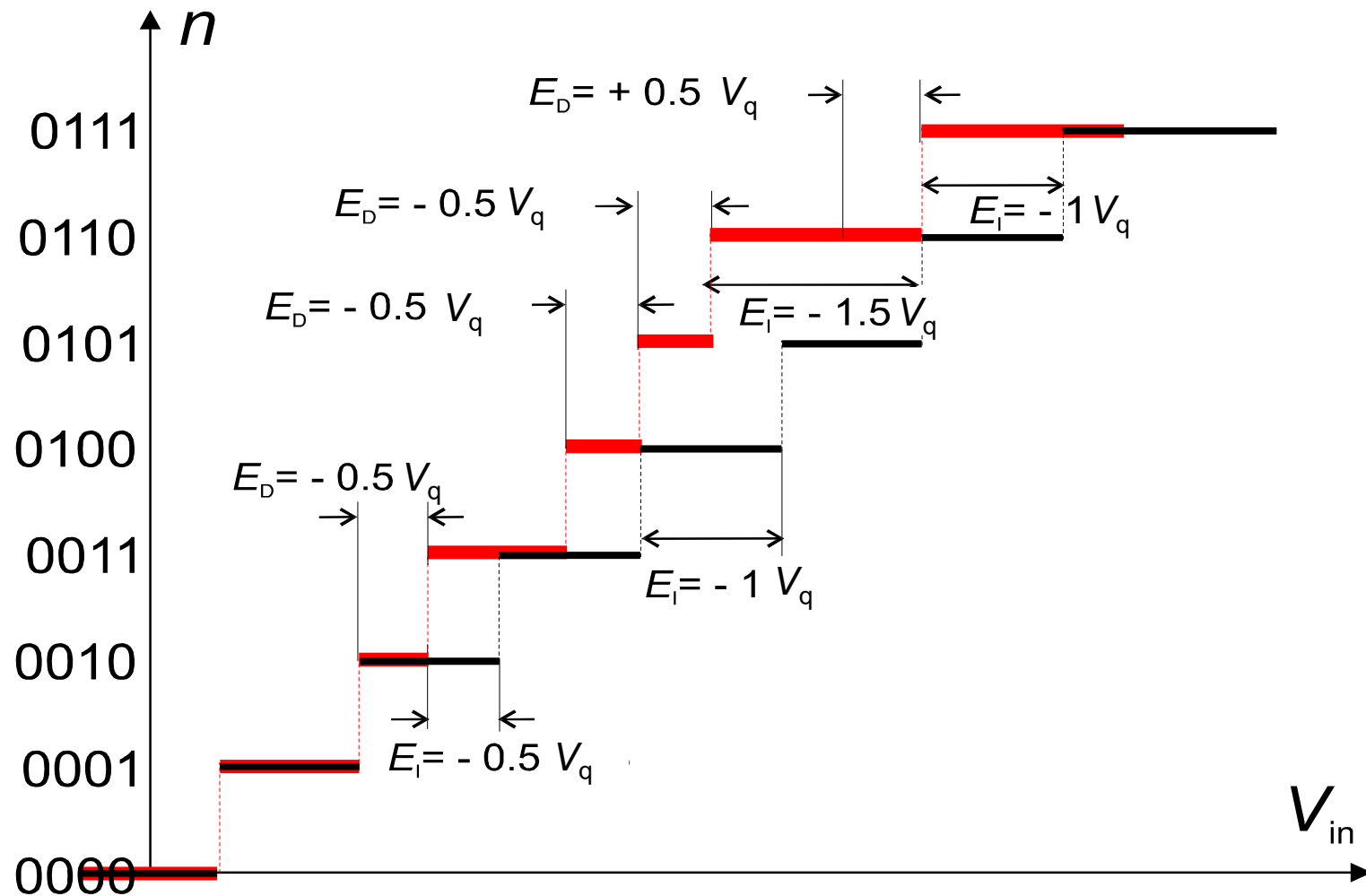
Errore di linearità integrale

- ✓ E_D indica lo scostamento dalla linearità di un particolare gradino della caratteristica del convertitore analogico/digitale
- ✓ E_I rappresenta la somma (integrale) degli errori di linearità differenziale lungo la caratteristica del convertitore

Convertitori analogico/digitale

● Caratteristica di trasferimento reale – Un esempio

■ E_D vs E_I



Convertitori analogico/digitale

● Incertezza e numero di bit effettivi

- Se la tensione applicata all'ingresso del convertitore è stimata mediante la funzione di taratura:

$$\hat{V}_{in} = n \cdot V_q = n \cdot \frac{V_{FR}}{2^{Nb}}$$

i contributi di incertezza da considerare sono quelli dovuti agli errori:

- ✓ di quantizzazione
- ✓ di fuori zero
- ✓ di guadagno
- ✓ di linearità integrale

Convertitori analogico/digitale

● Incertezza e numero di bit effettivi

■ Stima con modello deterministico:

$$\delta V_{\text{in}} = \delta e_q + \delta V_{\text{in}}^{E_0} + \delta V_{\text{in}}^{E_g} + \delta V_{\text{in}}^{E_I}$$

$$\delta V_{\text{in}} = 0.5 \cdot V_q + E_0 \cdot V_q + E_g \cdot \frac{n}{2^{\text{Nb}}} \cdot V_q + E_I \cdot V_q =$$

$$= V_q \cdot (0.5 + E_0 + E_I) + \frac{E_g}{2^{\text{Nb}}} \cdot n \cdot V_q$$

$$\frac{V_{\text{FR}}}{2^{\text{Nb}}}$$

$$V_{\text{in}}$$

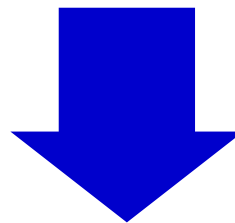
Convertitori analogico/digitale

● Incertezza e numero di bit effettivi

■ Stima con modello deterministico:

$$\delta V_{\text{in}} = V_{\text{FR}} \cdot \underbrace{\frac{0.5 + E_0 + E_I}{2^{N_b}}}_A + \underbrace{\frac{E_g}{2^{N_b}}}_B \cdot V_{\text{in}}$$

Total unadjusted error



$$\delta V_{\text{in}} = (A \cdot \text{Portata} + B \cdot \text{Lettura}) V$$

Convertitori analogico/digitale

● Incertezza e numero di bit effettivi

- Un altro modo per esprimere l'incertezza assoluta consiste nel dichiarare il **numero di bit effettivi** Nb^E :

↳ Numero di bit di risoluzione di un convertitore ideale con errore di quantizzazione E'_q che, all'estremo del campo di misura, è pari alla somma degli errori del convertitore reale:

$$E'_q = E_q + E_0 + E_g + E_I$$

numero di livelli che il convertitore riesce a distinguere:

$$N_{liv} = \frac{2^{Nb}}{E'_q}$$

Convertitori analogico/digitale

● Incertezza e numero di bit effettivi

- Il numero di bit effettivi Nb^E è il numero di bit necessari per rappresentare N_{liv} livelli:

$$Nb^E = \log_2 \left(\frac{2^{Nb}}{2 \cdot E'_q} \right) = Nb - \log_2 (2 \cdot E'_q)$$

Esempio: $Nb = 8$; $E_l = 1.5$ LSB

- $E'_q = E_q + E_l = 0.5 \text{ LSB} + 1.5 \text{ LSB} = 2 \text{ LSB}$

$$\Rightarrow Nb^E = 8 - \log_2 (4) = 6$$



Esempio di specifiche di un convertitore AD commerciale

Convertitore AD commerciale

■ *National Semiconductor ADC14L040*

- Massima frequenza di campionamento: 40 MSa/s
↳ $T_C = 25 \text{ ns}$
- Bit di risoluzione: $Nb = 14$
- Campo di misura unipolare o bipolare; *Full Range* = 2 V
↳ $V_q = 0.12 \text{ mV}$
- *On-chip Sample-and-Hold*
- Tempo di apertura del convertitore: $\tau = 2 \text{ ns}$
- Codifica di uscita: binaria con *offset* o in complemento a 2

Convertitore AD commerciale

● Specifiche di un convertitore commerciale

■ *National Semiconductor ADC14L040*

Symbol	Parameter	Conditions	Typical (Note 10)	Limits (Note 10)	Units (Limits)
STATIC CONVERTER CHARACTERISTICS					
	Resolution with No Missing Codes			14	Bits (min)
INL	Integral Non Linearity (Note 11)		±1.5	±3.8	LSB (max)
DNL	Differential Non Linearity		±0.5	±1.0	LSB (max)
PGE	Positive Gain Error		0.3	±3.3	%FS (max)
NGE	Negative Gain Error		0.4	±3.3	%FS (max)
TC GE	Gain Error Tempco	-40°C ≤ T _A ≤ +85°C	2.5		ppm/°C
V _{OFF}	Offset Error (V _{IN+} = V _{IN-})		-0.06	±1.0	%FS (max)
TC V _{OFF}	Offset Error Tempco	-40°C ≤ T _A ≤ +85°C	1.5		ppm/°C

$$E_{TOT} = E_q + E_I + E_o + E_g \cong 0.5 + 1.5 + \left(\frac{0.06}{100} + \frac{0.3}{100} \right) \cdot 8192 \cong 31 \text{ LSB}$$

Non sono prese in considerazione le derivate termiche

Convertitore AD commerciale

● Specifiche di un convertitore commerciale

■ National Semiconductor ADC14L040

$$E_{TOT} = E_q + E_I + E_o + E_g \cong 0.5 + 1.5 + \left(\frac{0.06}{100} + \frac{0.3}{100} \right) \cdot 8192 \cong 31 \text{ LSB}$$

- Numero di bit effettivi:

$$Nb^E = Nb - \log_2 (2 \cdot E_{TOT}) \approx 8$$

- Se si correggono gli errori di *offset* e di guadagno:

$$E_{TOT\ C} = E_q + E_I \cong 0.5 + 1.5 = 2 \text{ LSB}$$

$$Nb_C^E = Nb - \log_2 (2 \cdot E_{TOT\ C}) = 12$$