Misure di tempo, frequenza, . . .

Tempo: grandezza fondamentale

Frequenza: grandezza “duale” del tempo

di interesse per le telecomunicazioni

conversione di altre grandezze fisiche in **Tempo**

conversione di altre grandezze fisiche in **Frequenza**

- Metodi di misura moderni basati su contatori
- Riferimento di frequenza basato su oscillatori a quarzo
  - frequenze tipiche dell’ordine di 1-10 MHz
  - accuratezza tipica di qualche parte per milione (RTXO)
  - o migliore: 0.5 p.p.m. (TCXO)
  - o ancora migliore: 0.005-0.2 p.p.m. (OCXO)

[Room Temperature, Thermal Compensated, Oven-Controlled Crystal Oscillator]

Frequenza

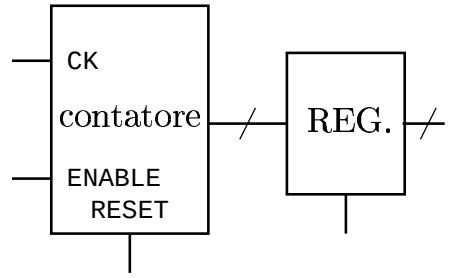
Definizione:

- Numero di cicli nell'unità di tempo
- Numero di eventi

Tecniche:

- metodi analogici
- metodi digitali (contatori, conteggio di eventi)

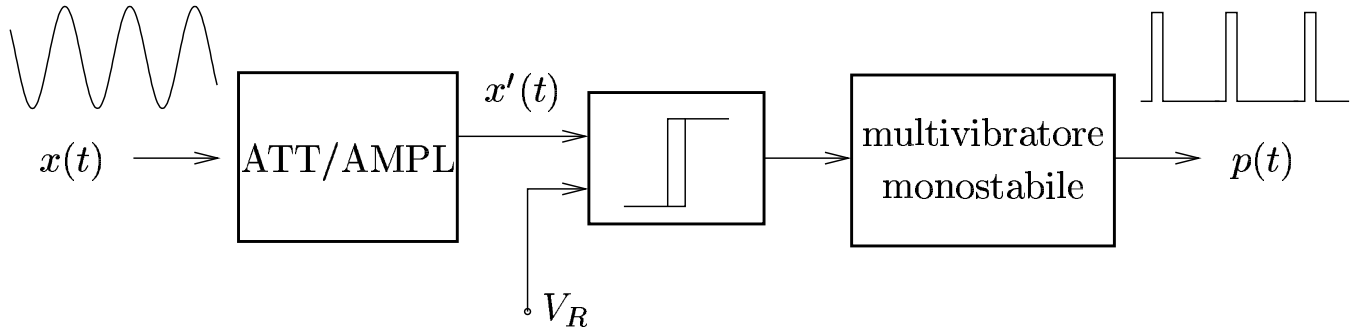
Contatore:



Gli eventi corrispondono a impulsi di *clock*

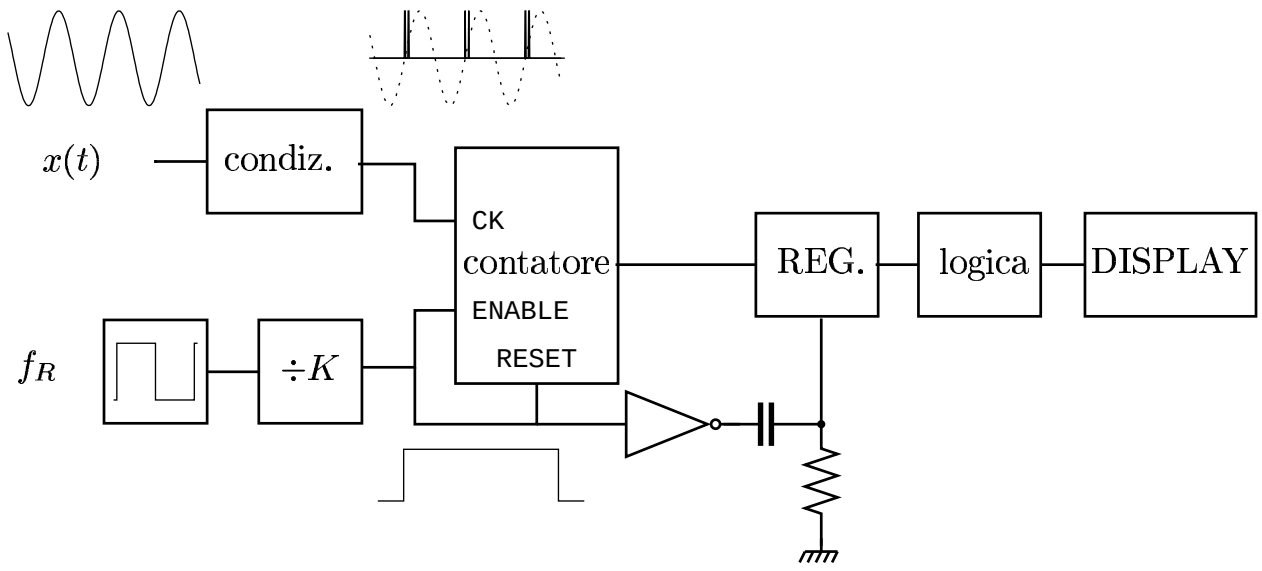
Conteggio di eventi

- Un evento $\Leftrightarrow$ un periodo $\Leftrightarrow$ un impulso



- il segnale richiede condizionamento
  - Ampiezza da regolare secondo le esigenze
  - Comparatore con isteresi
  - Soglia regolabile
  - Impulsi opportunamente brevi

Misure di frequenza (contatori)

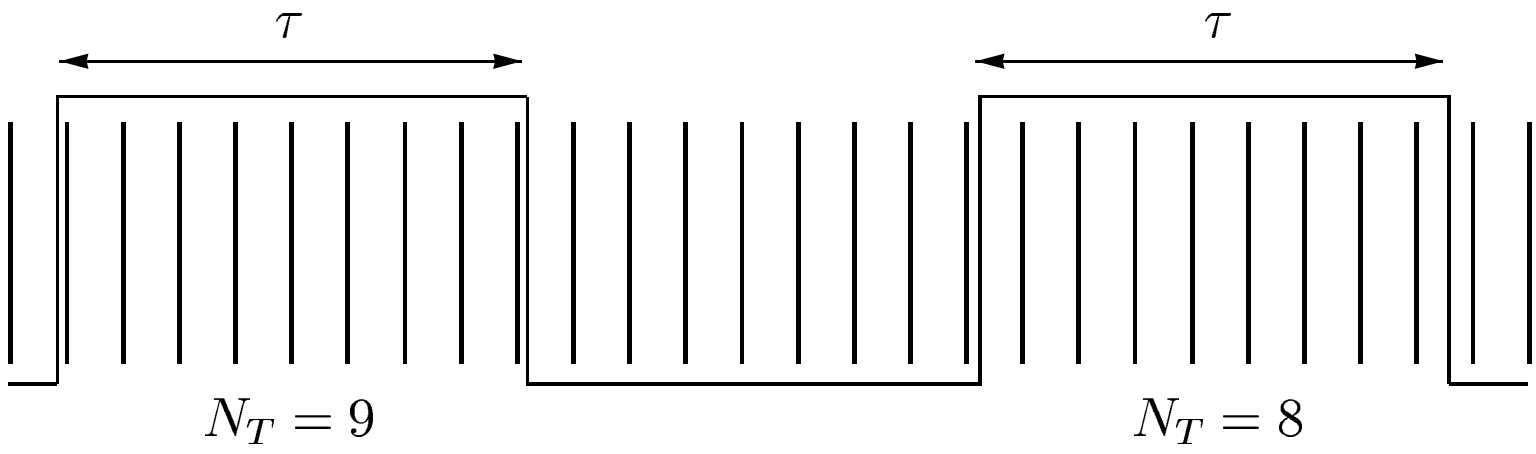


- il circuito pilota abilita il contatore: $\tau = K/(2f_R)$
- impulsi conteggiati:

$$N_T \simeq f_x \frac{K}{2f_R}$$

⚠ Errore di quantizzazione

Errore di quantizzazione



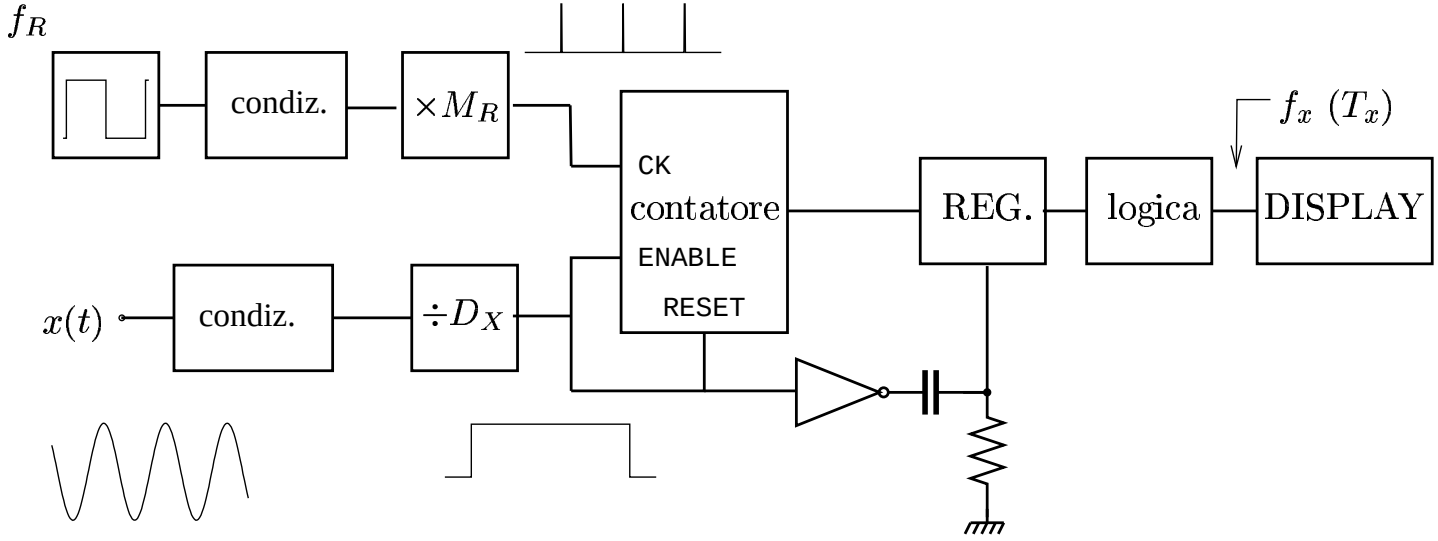
$$|\varepsilon_Q|_{\max} = 1 \qquad N_T \simeq f_x \frac{K}{2f_R} \qquad f_x \simeq \frac{2f_R N_T}{K} \qquad |\Delta f|_{\max} = \frac{2f_R}{K}$$

$$|\varepsilon_Q|_{\mathrm{rel,max}} = \frac{1}{N_T}$$

- È conveniente che N_T sia grande $\rightarrow$ che τ sia lungo
- N_T prossimo al fondo scala del contatore
- ⚠ $\Rightarrow$ Aumenta il tempo di misura (τ grande rispetto a T)

Misure di frequenza

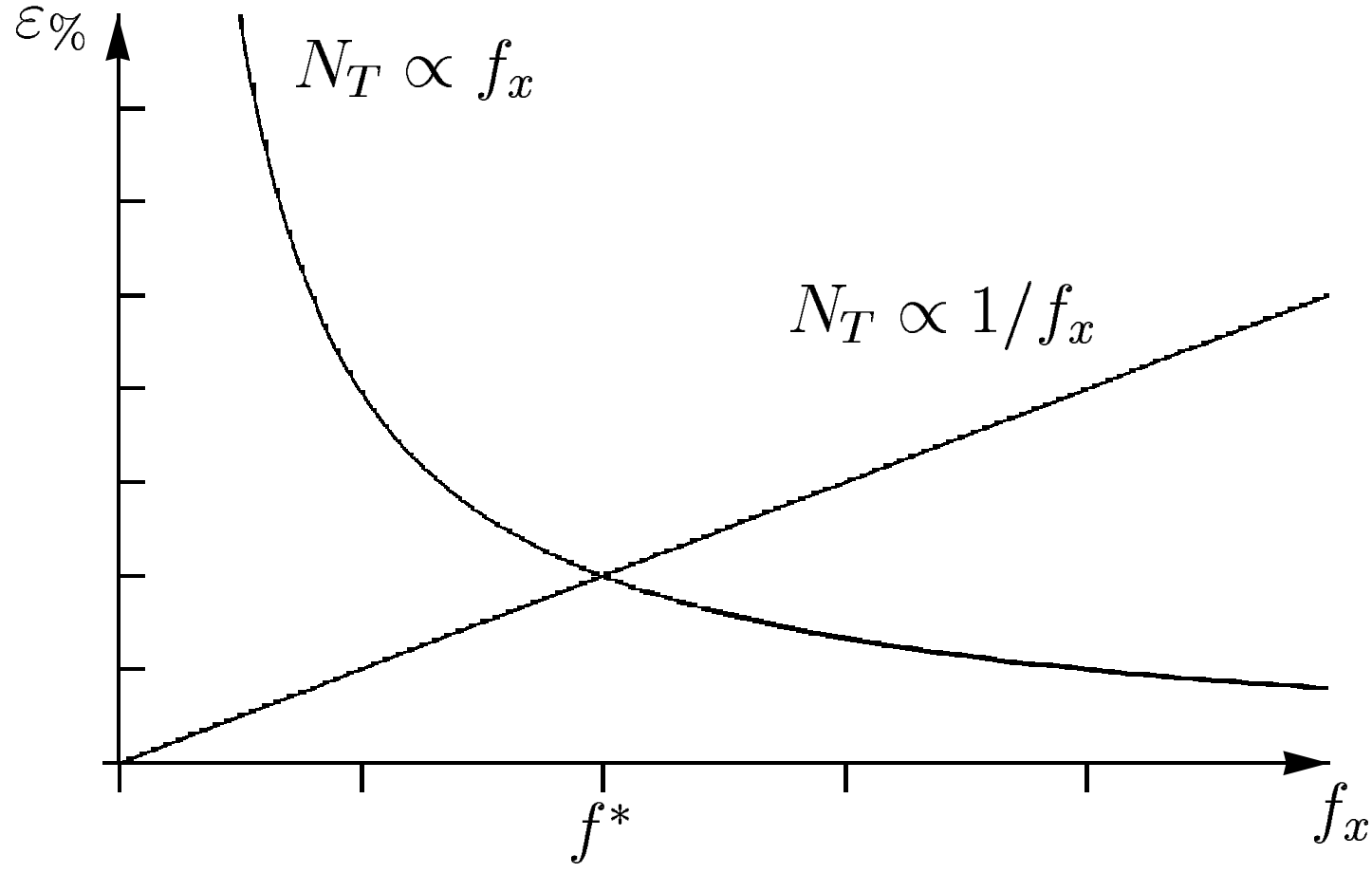
Per basse frequenze:



$$N_T = M_R f_R T_A = M_R f_R \frac{D_X}{2 f_x} = \frac{M_R T_x D_X}{2 T_R} \propto 1/f_x$$

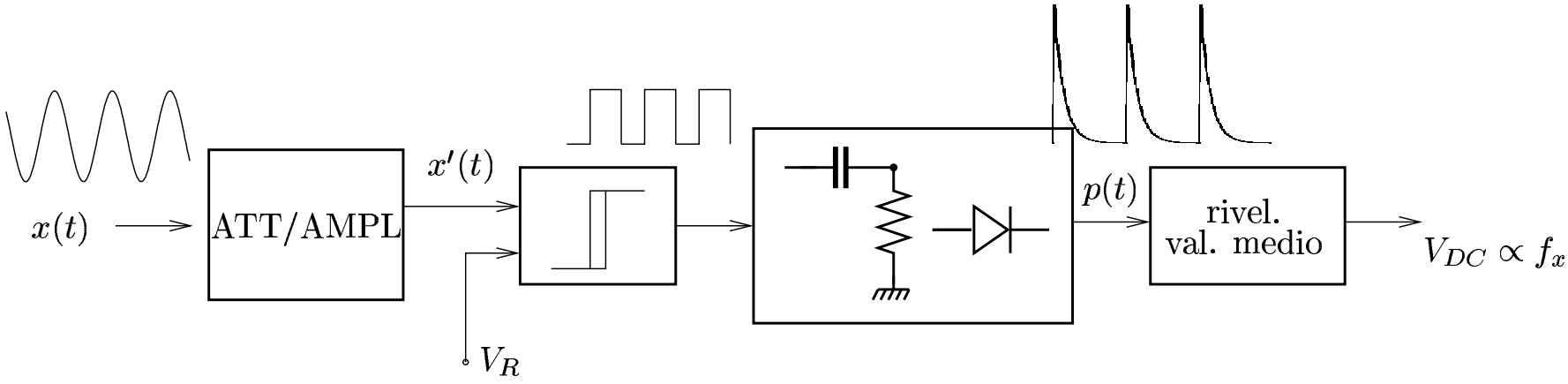
(periodimetro)

Confronto periodimetro - frequenzimetro



- $f < f^*$: frequenzimetro
- $f > f^*$: periodimetro

Misure di frequenza - tecniche analogiche

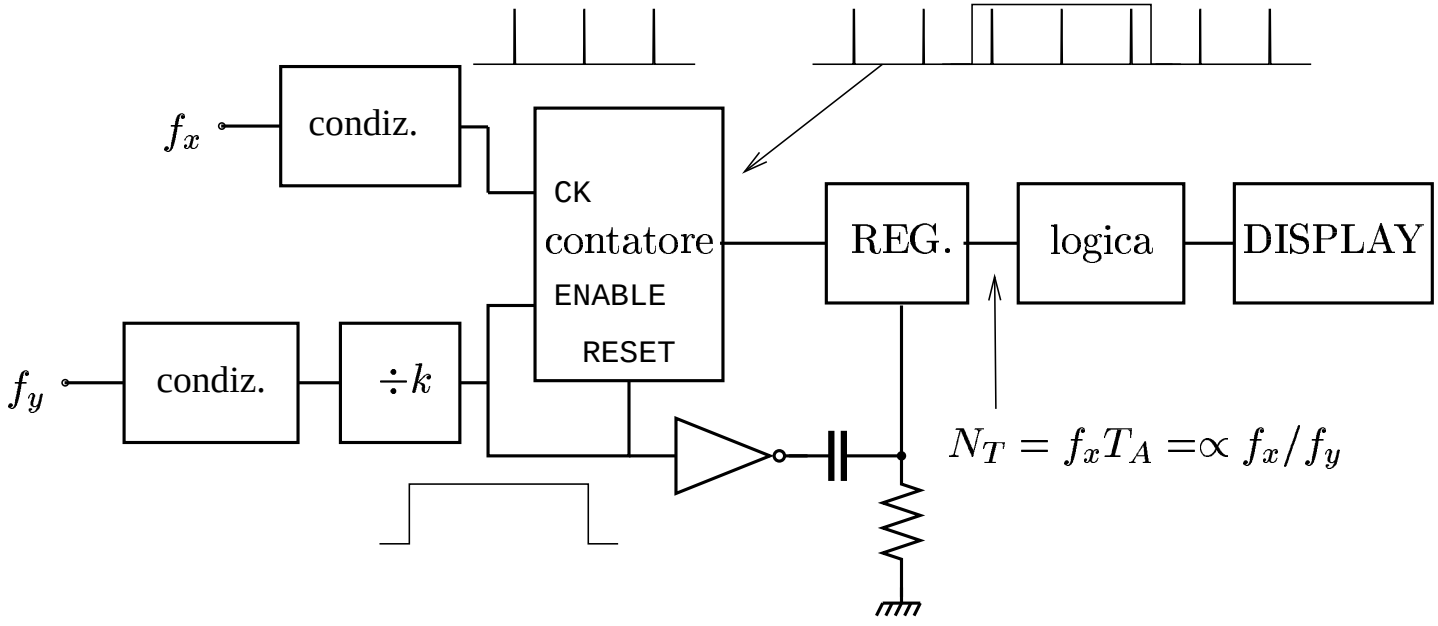


- impulsi non sovrapposti: $T/2 > 5RC \quad \rightarrow f_{\max} = 0.1/RC$
- impulsi stretti (o di forma indipendente dalla frequenza)

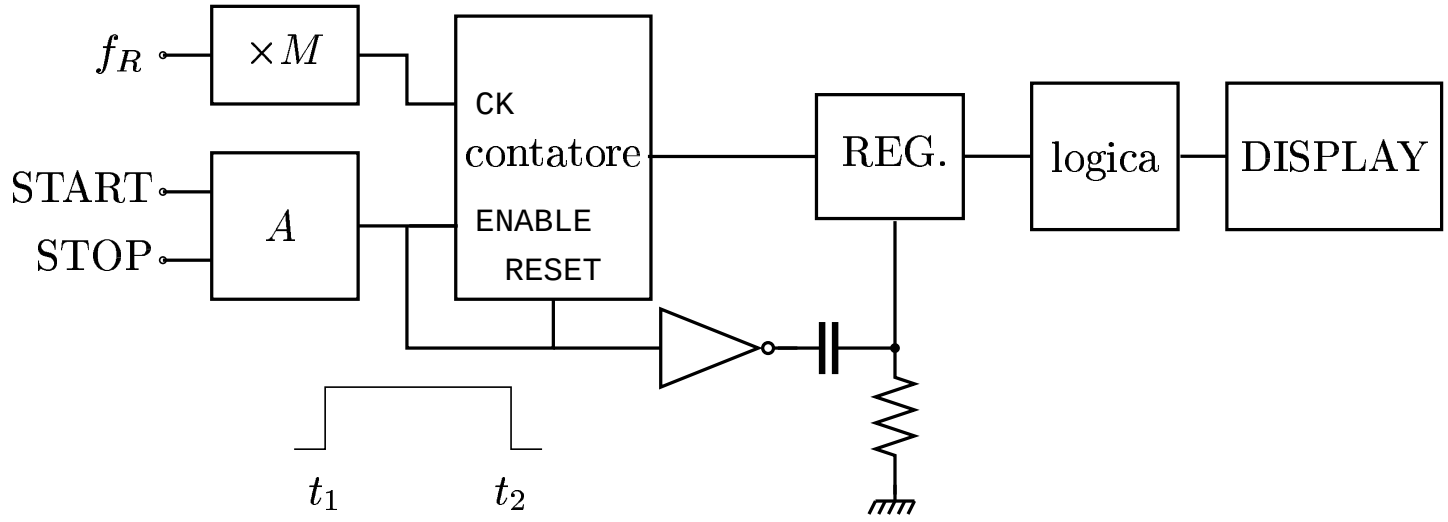
(Oltre che un frequenzimetro) è un discriminatore di frequenza ($V_U \propto f_x$)

Misure di rapporto tra frequenze

$$N_T = \frac{k f_x}{2 f_y} = k' \frac{f_x}{f_y} \propto \frac{f_x}{f_y}$$



Misure di intervalli di tempo



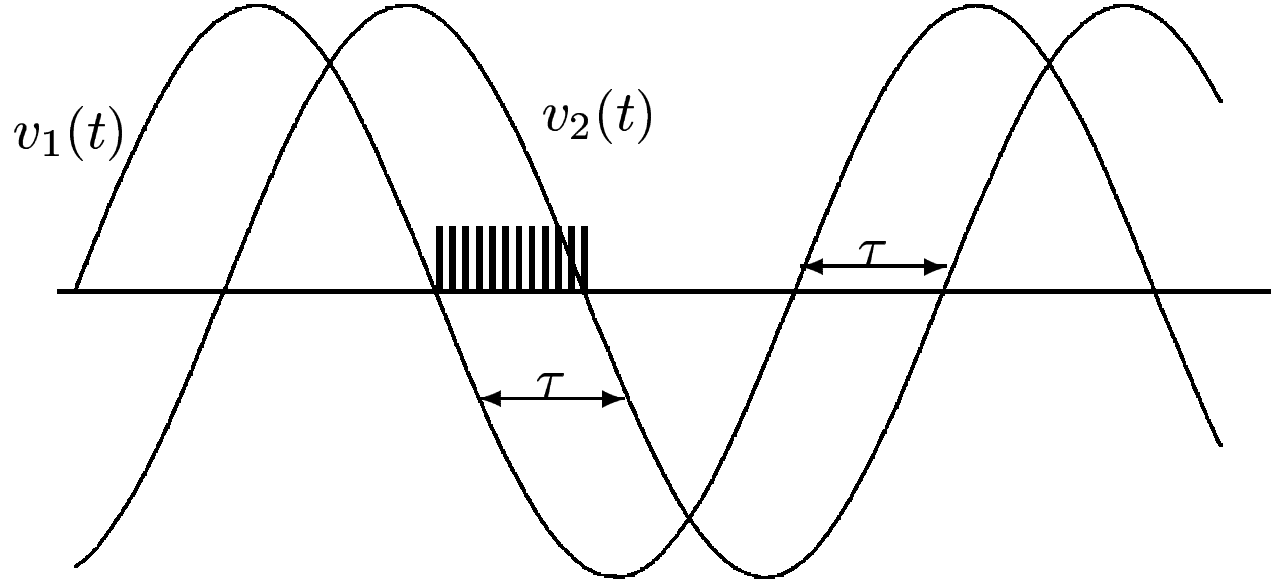
$$N_T = (t_2 - t_1) f_R M$$

Misure di sfasamento

- È una misura del ritardo τ di $v_2(t)$ su $v_1(t)$, rapportato al periodo:

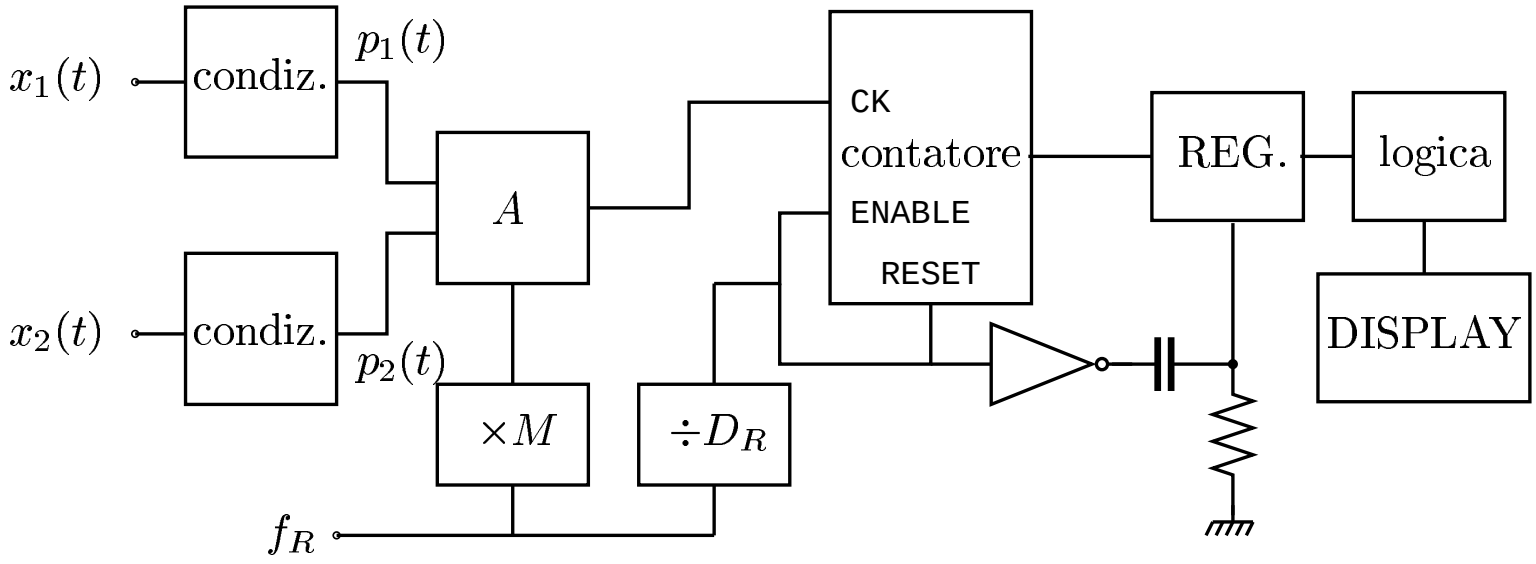
$$\vartheta = 2\pi \frac{\tau}{T}$$

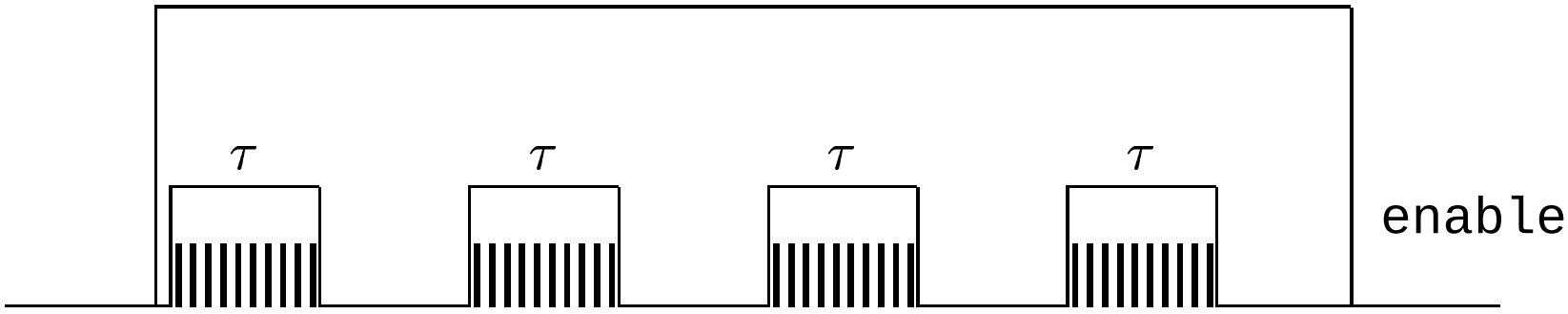
- conteggio dei periodi di un segnale (f_R) durante il “ritardo”



- conteggio di impulsi durante il “ritardo”

Misura di sfasamento (contatori)





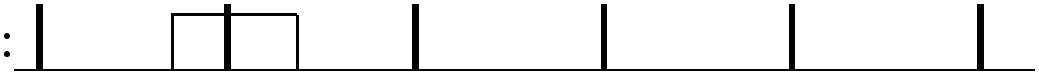
$$N_T = \tau f_R M \frac{T_{en}}{T} = \frac{\tau}{T} f_R M T_{en} = \frac{\vartheta}{2\pi} f_R M \frac{D_R}{2 f_R} = \frac{\vartheta}{4\pi} M D_R$$

Metodi speciali - misure ripetute

caso limite: $\tau < T_C$



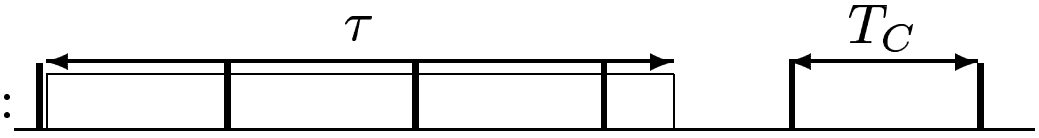
$P(0) = (T_C - \tau)/T_C \;\rightarrow\; 0$



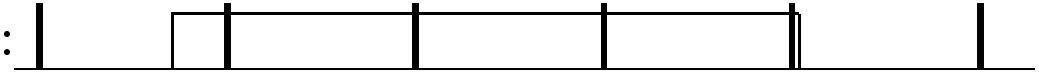
$P(1) = \tau/T_C \;\rightarrow\; T_C$

val. medio: $\overline{N_M} = 1 \cdot P(1) + 0 \cdot P(0) \rightarrow \quad \overline{T} = \tau$

caso generico: $\tau = (N + f)T_C, \quad 0 < f < 1$



$P(N) = (1 - f) \;\rightarrow\; NT_C$



$P(N+1) = f \quad \rightarrow \; (N+1)T_C$

val. medio: $\overline{N_M} = N \cdot P(N) + (N+1) \cdot P(N+1) \quad \rightarrow \overline{T} = (N+f)T_C$

Contatori Universali

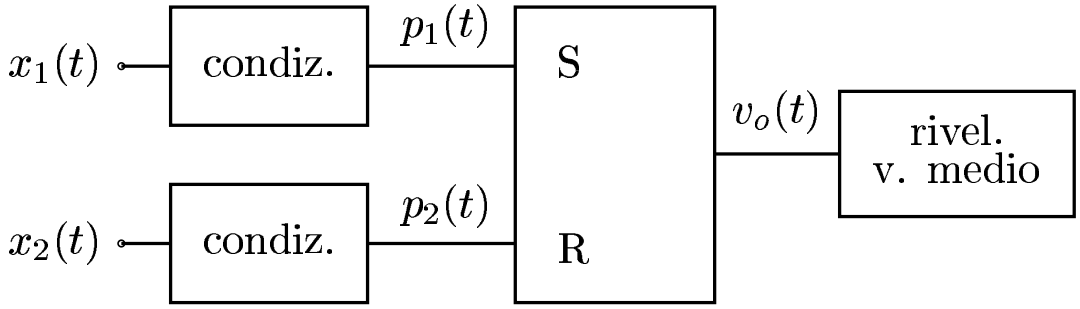
- Strumenti basati su contatori, integrano le funzioni di:
  - frequenzimetri/periodimetri
  - misuratori di sfasamento
  - misuratori di intervalli di tempo
  - misuratori di rapporto di frequenze
  - contatori di eventi
  - ...

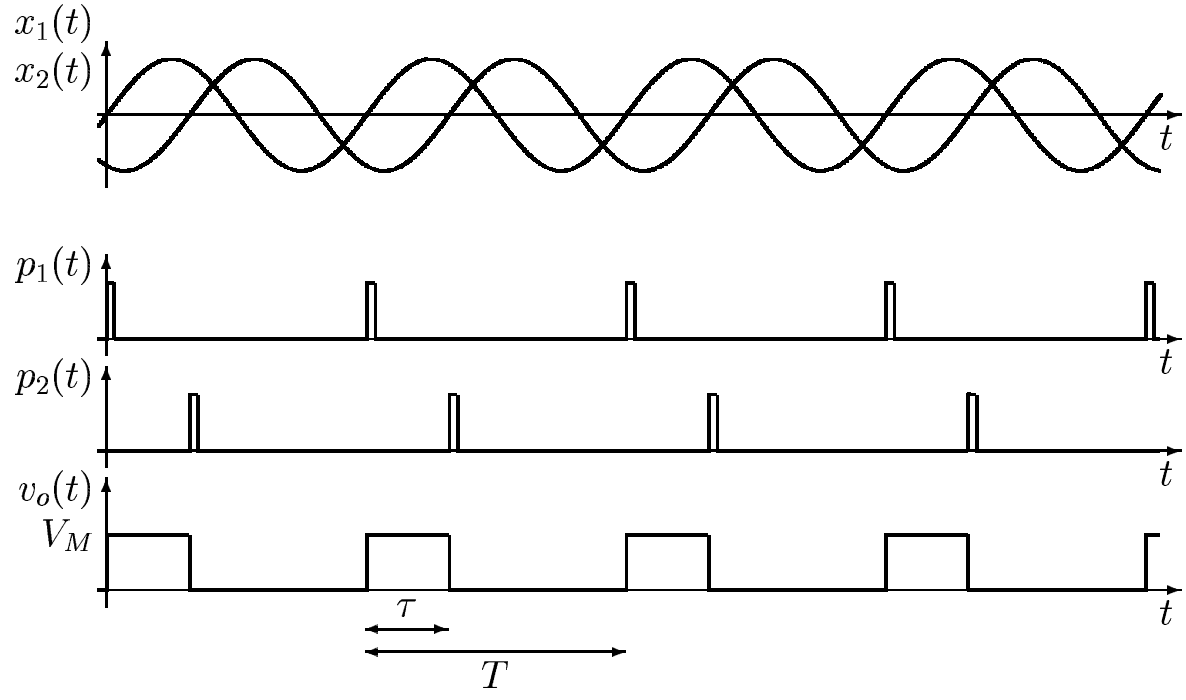
Parametri caratteristici:

- *range*
- risoluzione (min Δf, min Δt)
- sensibilità (min v)
- accuratezza (ε_f, ε_t)

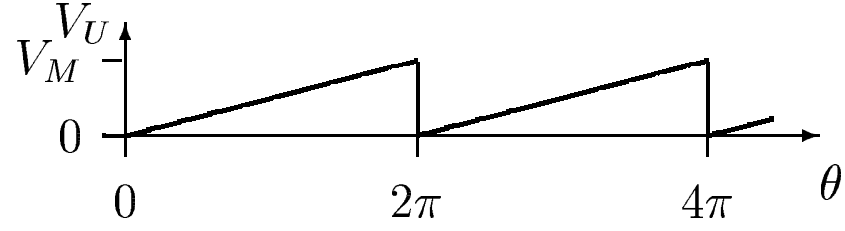
  dipendente dalla stabilità dell'oscillatore di riferimento

Misure di sfasamento - altri metodi

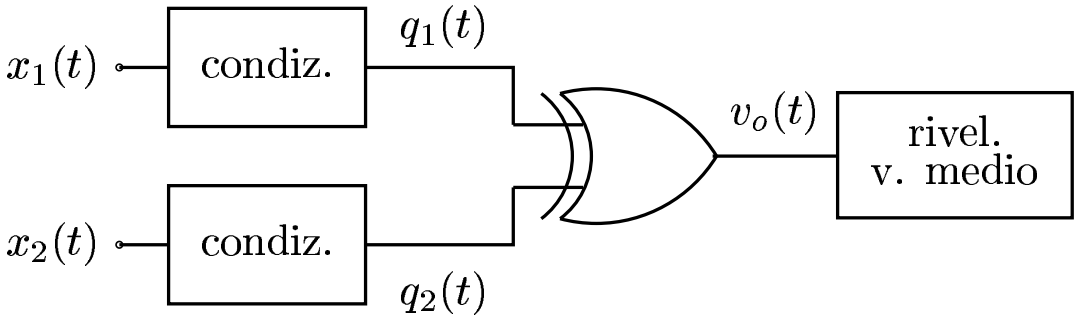


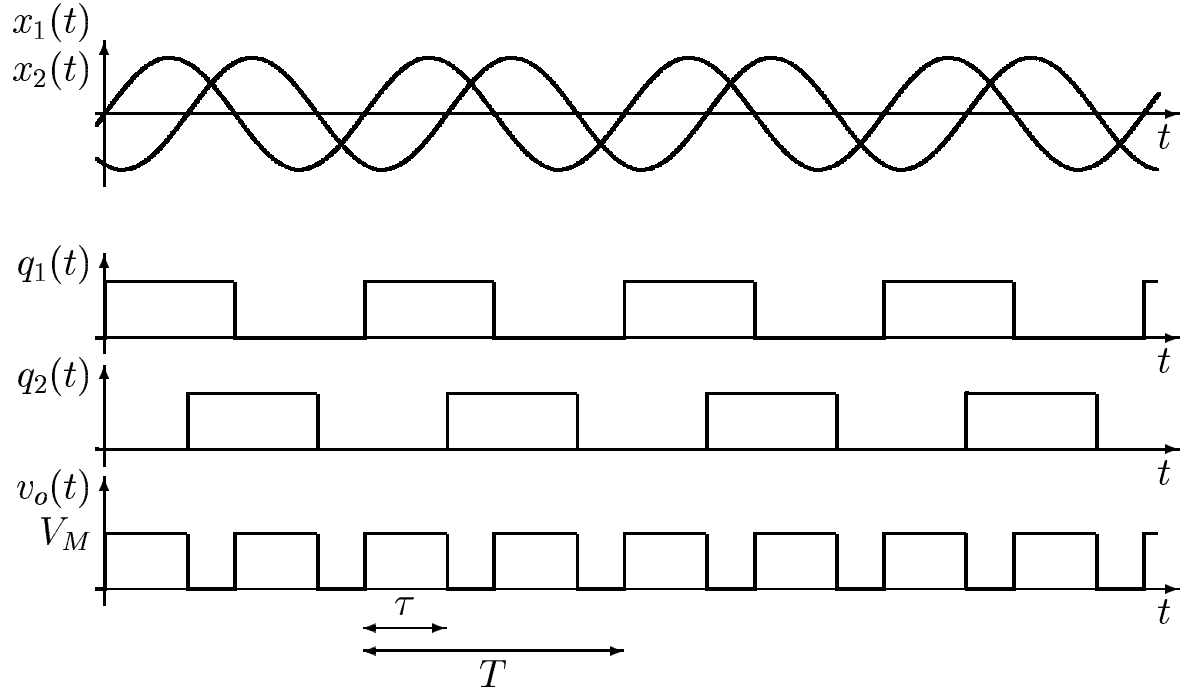


$$\delta = \frac{\tau}{T} = \frac{\theta}{2\pi} \qquad V_U = V_M \frac{\tau}{T} = V_M \frac{\theta}{2\pi}$$



Misure di sfasamento - altri metodi (2)





$$V_U = V_M \frac{|\theta|}{2\pi}, \quad -\pi < \theta < \pi$$

