

## Chimica Analitica e Ambiente

Corsi di Laurea Magistrale in Chimica e Chimica Industriale  
Università degli Studi di Padova

# Segnale e Rumore Strumentale

**Andrea Tapparo**

Università degli Studi di Padova  
Dipartimento di Scienze Chimiche  
Via Marzolo 1, 35131 Padova; [andrea.tapparo@unipd.it](mailto:andrea.tapparo@unipd.it)



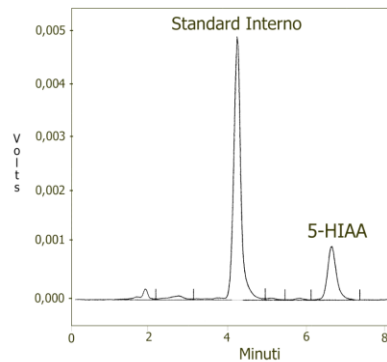
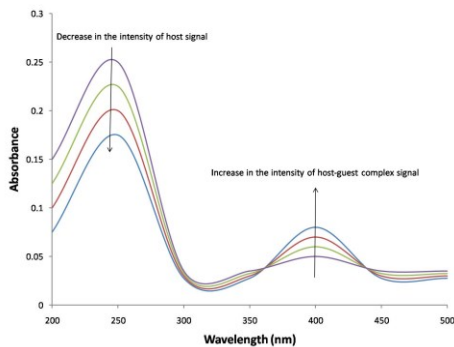
Anno accademico 2023-24

1

## Segnali Strumentali

Un segnale è un **modello matematico** che descrive la variazione di una grandezza fisica misurabile.

Può pertanto essere rappresentato da una funzione matematica, ad una o più variabili indipendenti, o dalla sua rappresentazione grafica.

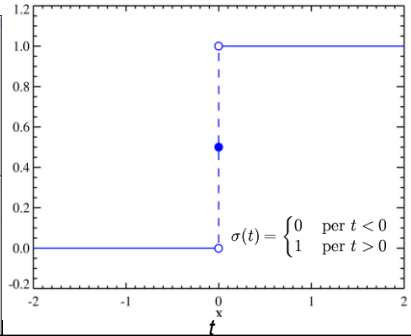
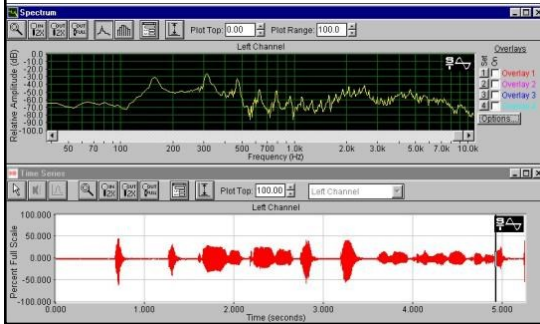
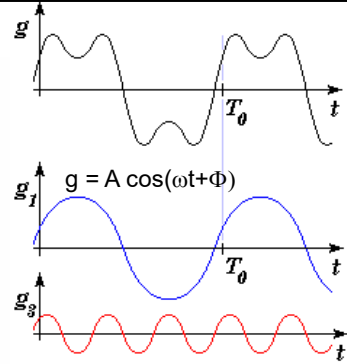


Fonte: G. Gelli, Elaborazione dei segnali deterministici, 2002

2

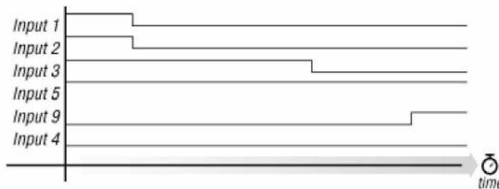
## Esempi di Segnali

- *Esempio:* segnale sinusoidale. La tensione in una rete di distribuzione dell'energia elettrica può essere descritta da un segnale sinusoidale  $v(t)$  variabile nel tempo.
- *Esempio:* segnale vocale. La voce può essere descritta da una pressione acustica  $p(t)$  variabile nel tempo. La natura del segnale vocale è diversa a seconda del sesso, dell'età, del timbro, dell'umore del parlatore e del suono (consonante, vocale) pronunciato.
- *Esempio:* segnale logico. La codifica degli stati logici 0 ed 1 avviene in un calcolatore associando ad essi due livelli di tensione, ad esempio 5V e 0V. Il segnale risultante descrive in un punto della rete la variazione dello stato logico nel tempo.

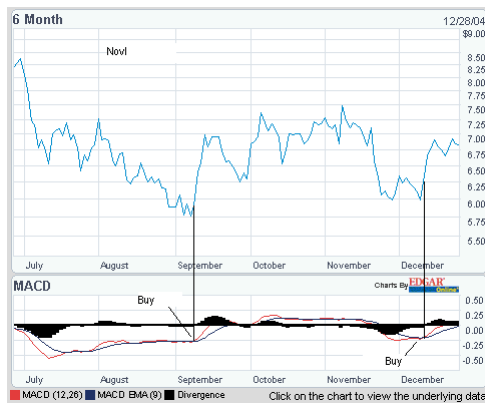


3

## Segnali deterministici e non deterministici (aleatori)



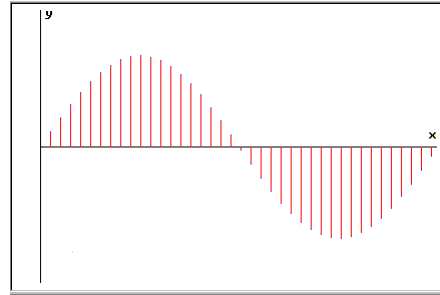
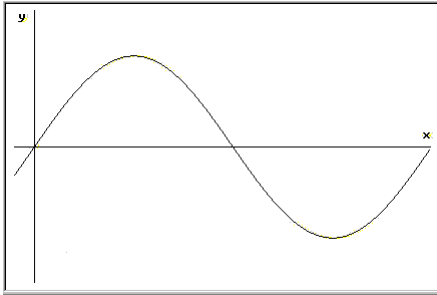
I segnali **deterministici** sono perfettamente descritti dalla funzione matematica (tipicamente in funzione del tempo). Sono quindi prevedibili.



I segnali **non deterministici** non sono perfettamente descrivibili in termini matematici. Non sono quindi prevedibili e per la loro descrizione si ricorre ad approcci probabilistici (statistici).

4

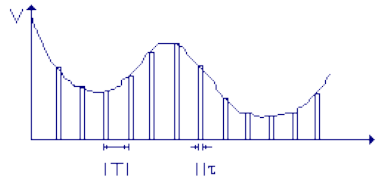
## Segnali a tempo continuo e a tempo discreto



La variabile tempo può variare in un dominio **continuo** o **discreto**.

La trasformazione di un segnale a **tempo continuo** in uno a **tempo discreto** si realizza con il **campionamento** del segnale.

Ogni campionamento è caratterizzato da una **frequenza di campionamento**,  $f_{\text{camp}}$ .



$T$  = PERIODO DI CAMPIONAMENTO  
 $f = 1/T$  = FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO  
 $\tau$  = PERIODO DI MANTENIMENTO DEL SEGNALE

*Segnale analogico campionato ad intervalli di tempo  $\tau$  per tempi  $T$*

5

## Componenti del segnale strumentale

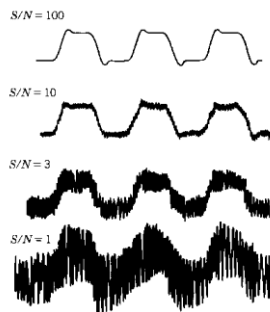
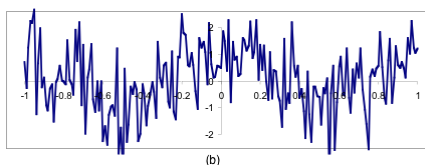
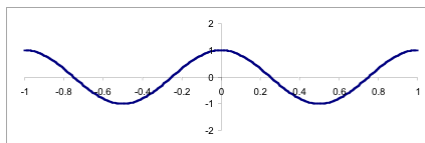
Un segnale strumentale tipicamente contiene tre componenti principali

$$S = S_A + S_0 + N$$

$S_A$  è il segnale analitico, che contiene l'informazione di interesse, spesso in chimica analitica è correlato alla concentrazione dell'analita. E' una componente **deterministica** del segnale.

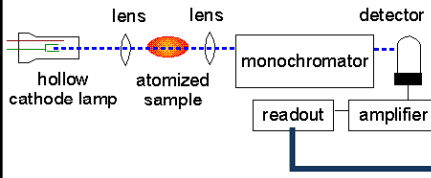
$S_0$  è il segnale di fondo, o background, che rappresenta la componente strumentale che si misura in assenza di analita. Anche questa componente è **deterministica**, e viene tipicamente valutata con la misura del bianco.

$N$  è la componente rumore, che è tipicamente **non deterministica**.



6

## Esempio: Spettrofotometria di Assorbimento Atomico

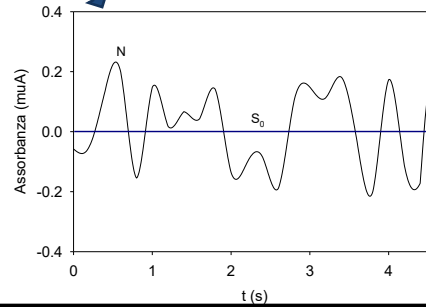
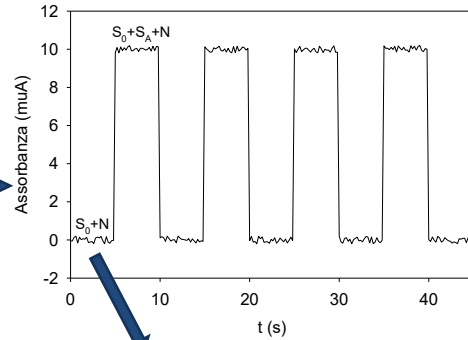


$S_0$  viene misurato analizzando segnale del bianco e determinando il suo valore medio

$$S_0 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n}$$

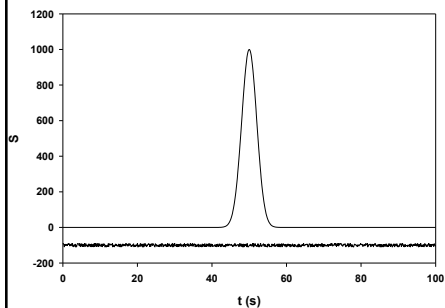
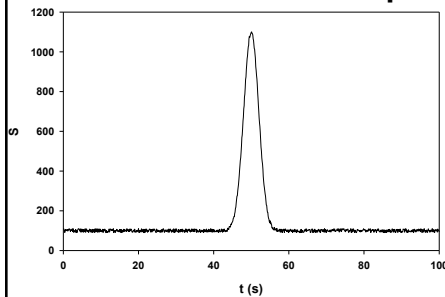
$S_0 + S_A$  viene valutato in maniera analoga, ovvero determinando il valore medio. Per differenza otteniamo  $S_A$ .

La componente rumore  $N$ , è tipicamente casuale e non può essere trattata come un segnale deterministico. La sua valutazione (o l'effetto che ha sulla misura della componente deterministica) avviene ricorrendo ad una trattazione statistica.



7

## Esempio: Cromatografia

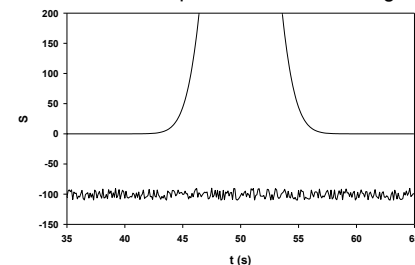


Il segnale del rivelatore  $S$  viene acquisito in continuo, ovvero con una frequenza di campionamento relativamente grande. Si tratta quindi di un segnale a tempo continuo a cui si sovrappone la componente non deterministica  $N$ .

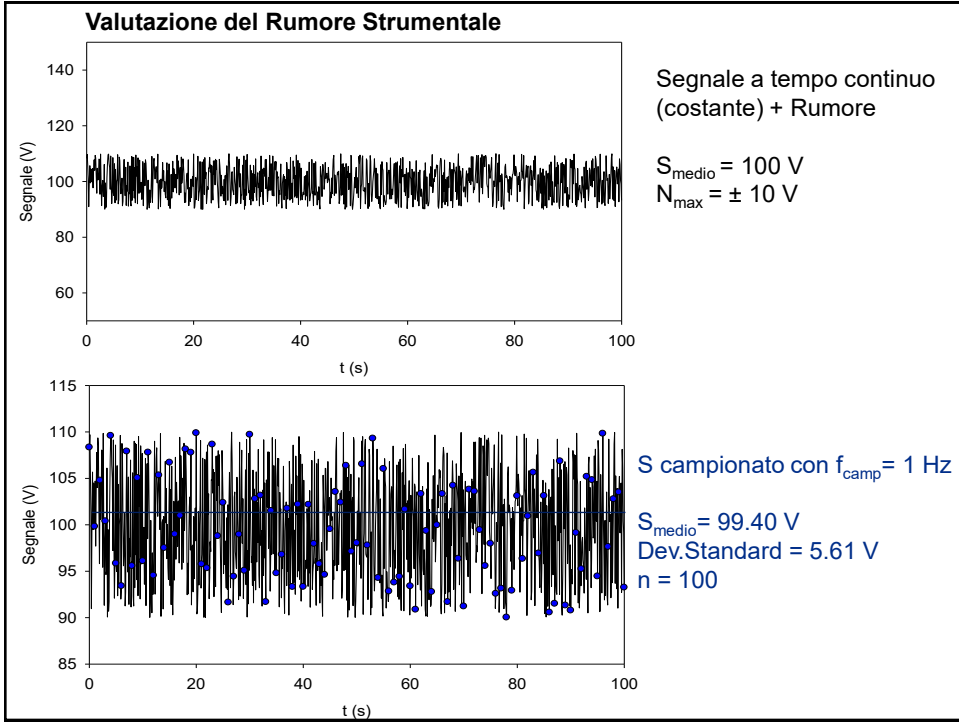
L'informazione analitica è ricavata dall'area o dall'altezza del picco, valore che è condizionato dal rumore strumentale.

Se fossimo in grado di separare i due contributi  $S$  e  $N$ , avremmo la misura sperimentale (l'area del picco) esente da imprecisione dovuta al rumore.

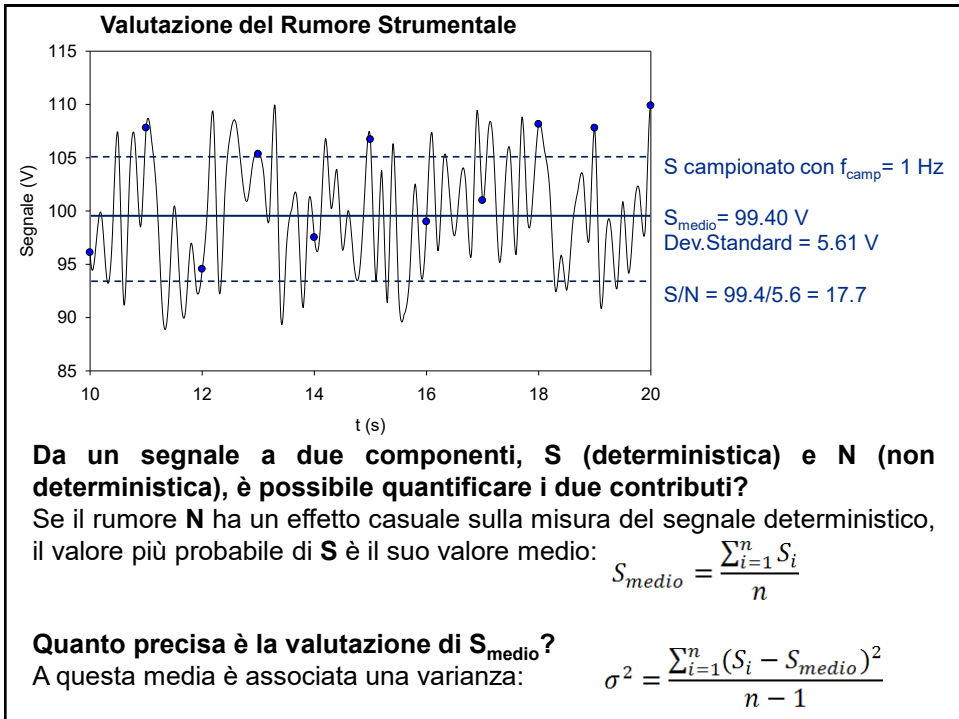
Non essendo questo possibile, stimiamo l'area attraverso misure ripetute in modo da ridurre l'effetto delle componenti casuali del segnale ( $N$ ).



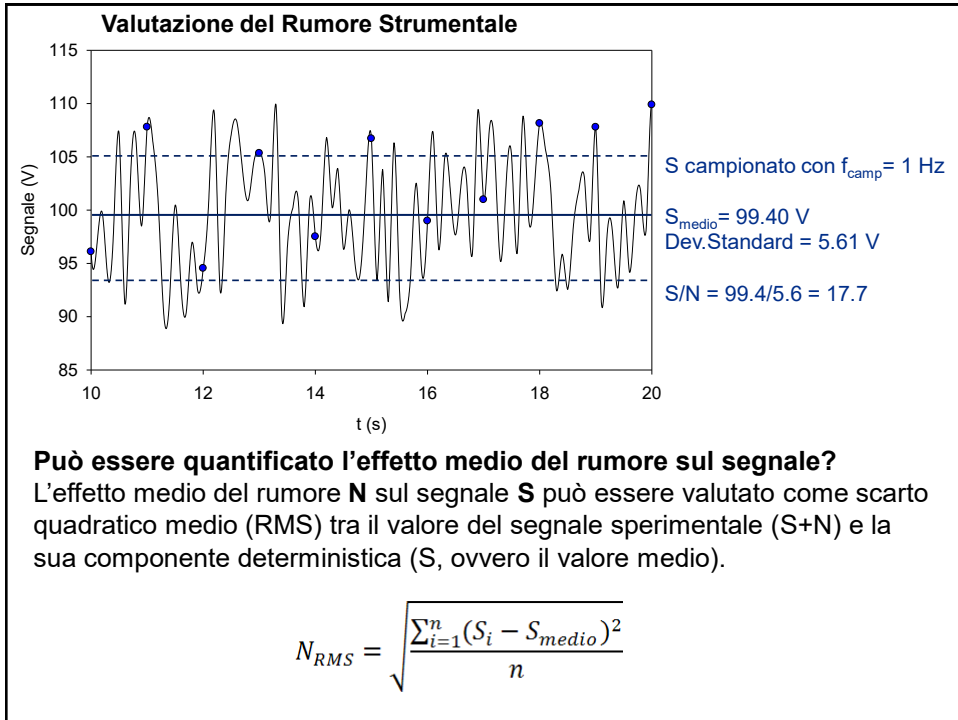
8



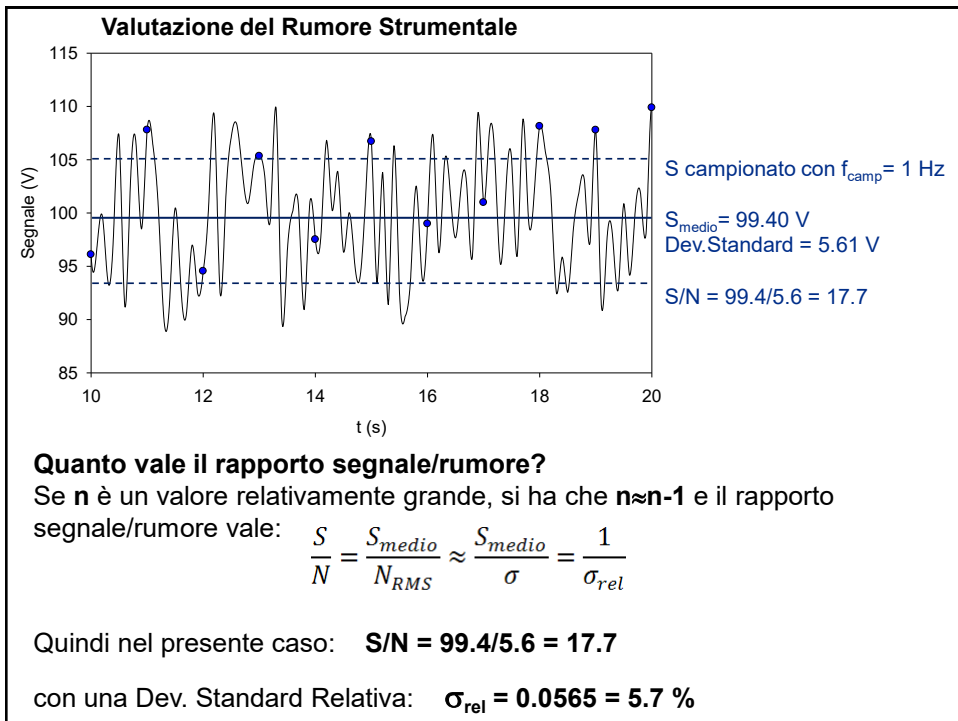
9



10

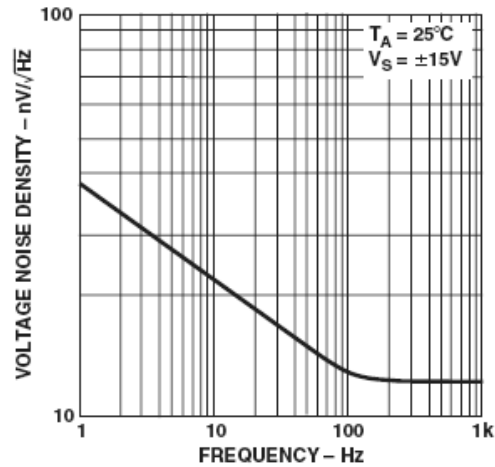


11



12

## Tipi e caratteristiche del Rumore Strumentale



13

Lo spettro di potenza del rumore (ovvero la sua intensità in funzione della frequenza del segnale) indica che siamo in presenza di diverse tipologie di rumore. In particolare si osserva che cause differenti di rumore strumentale agiscono in differenti intervalli di frequenze.

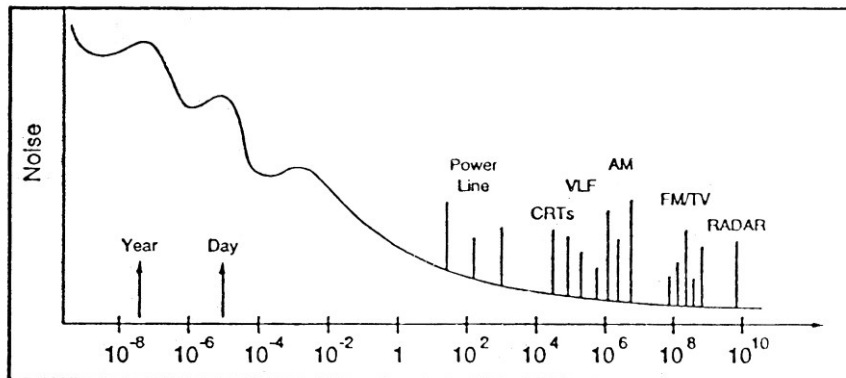
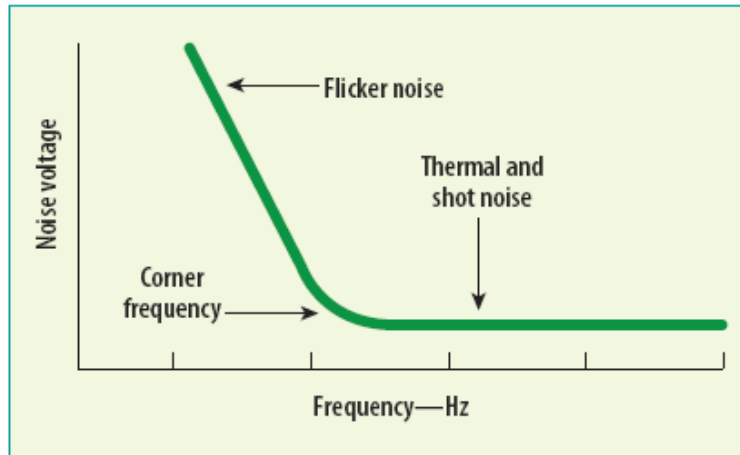


Figure 3: Simplified Noise Spectrum

14

Almeno due componenti interessano segnali contenuti in ampi intervalli di frequenze: il **rumore bianco** (o termico) che è indipendente dalla frequenza e il **rumore rosa** (Flicker noise) che dipende da  $1/f$ .



Flicker noise is low-level semiconductor device noise that increases as a function of inverse carrier frequency, or  $1/f$ .

15

## Rumore strumentale

Rumore termico (o rumore di Johnson)

È dovuto all'agitazione termica degli elettroni nei conduttori

$$V_{rsm} = \sqrt{4k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}$$

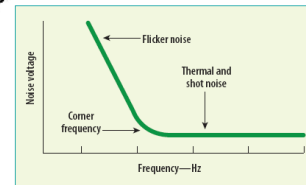
$V_{rsm}$  valore quadratico medio del rumore

$k$  costante di Boltzmann

$T$  temperatura

$R$  resistenza

$\Delta f$  ampiezza di banda



Flicker noise is low-level semiconductor device noise that increases as a function of inverse carrier frequency, or  $1/f$ .

L'entità del rumore è indipendente dalla frequenza (rumore "bianco")

16



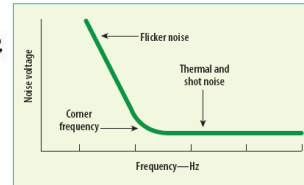
## Rumore strumentale

### Rumore granulare ("shot noise")

È dovuto alla natura corpuscolare dei portatori di carica (elettroni, o eventualmente lacune)

$$i_{rms} = \sqrt{2 \cdot I \cdot e \cdot \Delta f}$$

$i_{rms}$     valore quadratico medio del rumore  
 $I$         valore medio della corrente  
 $e$         carica dell'elettrone  
 $\Delta f$      ampiezza di banda



Flicker noise is low-level semiconductor device noise that increases as a function of inverse carrier frequency, or  $1/f$ .

Anche in questo caso l'entità del rumore è indipendente dalla frequenza (rumore "bianco")

17

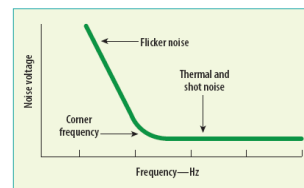
## Rumore strumentale

### Rumore eccessivo, o di sfarfallamento (flicker noise)

Si origina in componenti elettronici (resistori, transistor, ecc.) per un'insieme di cause non ben comprese, ed è approssimativamente proporzionale ad  $1/f$ .

$$V_{rms} \propto \frac{1}{f^n}$$

$n$         esponente prossimo ad 1



Flicker noise is low-level semiconductor device noise that increases as a function of inverse carrier frequency, or  $1/f$ .

Un esempio importante di rumore eccessivo è rappresentato dalla deriva presentata da numerosi dispositivi di misura (trasduttori, amplificatori, ecc.).

18

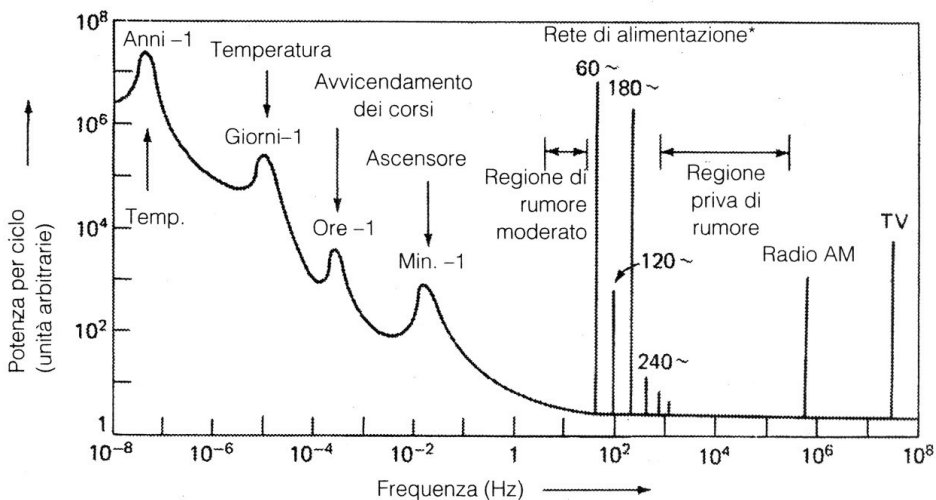
## Rumore ambientale

Fonti:

- a) campi elettromagnetici
  - linee elettriche
  - trasmissioni radio e TV; telefoni cellulari
  - scariche elettriche atmosferiche
  - motori elettrici
  - (ecc.)
- b) effetti meccanici (vibrazioni)

19

## Rumore Strumentale + Rumore Ambientale



Aumentare  $f$  porta ad una riduzione del rumore rosa.

Limitare  $\Delta f$  significa ridurre il rumore bianco e il rumore granulare.

20

## Tecniche di riduzione del Rumore filtri analogici, RC

FIGURE 2.5

Filter types: (a) low-pass, (b) high-pass, and (c) active or bandpass.

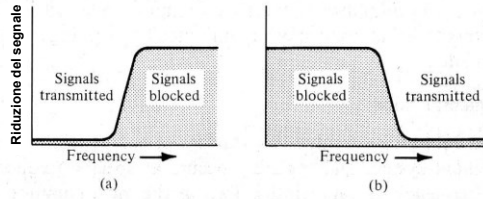
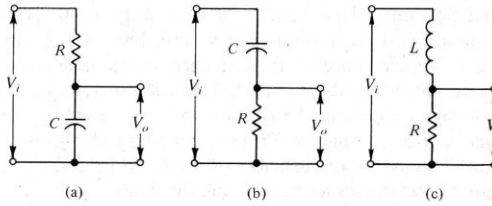


FIGURE 2.6

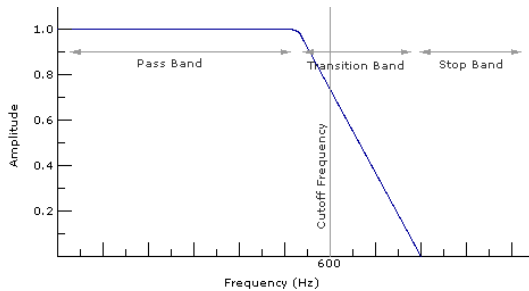
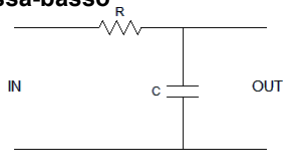
Passive filters: (a) low-pass RC filters, (b) high-pass RC filter, and (c) low-pass LR filter.



21

## Tecniche di riduzione del Rumore filtri analogici, RC

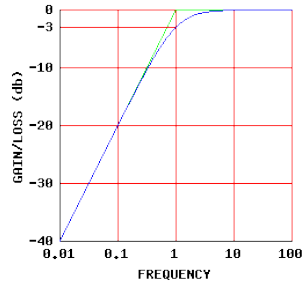
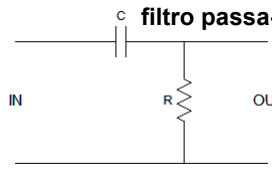
filtro passa-basso



Low pass filter with a cutoff frequency of 600Hz

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2}} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

filtro passa-alto



22

## Tecniche di riduzione del Rumore filtri analogici, RC

Utilizzando diversi circuiti è possibile costruire vari filtri analogici.

In particolare possiamo selezionare un intervallo di frequenze dove operare:  $\Delta f$ . Questo contribuisce significativamente a ridurre il rumore bianco.

E' importante sottolineare che la banda passante effettiva che caratterizza un modulo della strumentazione potrebbe però essere molto più ampia. Essa è infatti in relazione al tempo di risposta dinamico della strumentazione. Vale cioè la relazione:

$$\Delta f_{eff} \approx \frac{1}{t_{risp}}$$

23

Pertanto, dispositivi che sono caratterizzati da un tempo di risposta breve (rapidi) saranno caratterizzati da un elevato valore di  $\Delta f$ .

Al contrario, dispositivi che rispondono lentamente ( $t_{risp}$  elevato) saranno caratterizzati da una banda passante effettiva più contenuta

$$\Delta f_{eff} \approx \frac{1}{t_{risp}}$$

Il tempo di risposta viene definito come tempo di salita (o discesa) del segnale di output da un valore del 10% a un valore del 90% della sua variazione, quando in input si ha una variazione istantanea (gradino).

RCLED  $T = 300\text{ K}$   
 $V_{on} = 1.4\text{ V}$   $V_{off} = 0.0\text{ V}$   
 $f_{3dB} = 490\text{ MHz}$

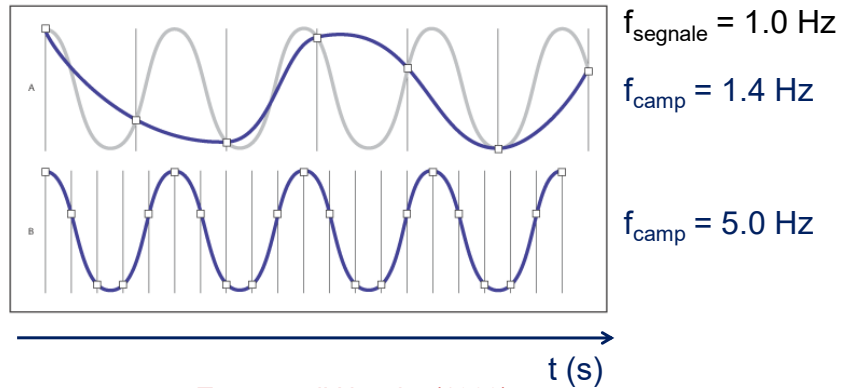
Fig. 24.2. Measured (a) rise time ( $\tau_{rise} = 2.4\text{ ns}$ ) and (b) fall time ( $\tau_{fall} = 1.1\text{ ns}$ ) of an RCLED. The photodetector used in the measurement is much faster than the LED, so that the measured times are essentially the rise and fall times of the LED.

E. F. Schubert  
 Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)  
[www.LightEmittingDiodes.org](http://www.LightEmittingDiodes.org)

24

Nell'esempio precedente (emissione LED) si sottolinea che il segnale in output viene acquisito con un fotomoltiplicatore, dispositivo che ha una risposta molto più rapida del LED.

Il tempo di risposta di un dispositivo limita infatti anche la frequenza dei segnali che possono essere efficacemente processati (o misurati). Ad esempio, per un convertitore analogico-digitale (A/D),  $t_{\text{risp}}$  determinerà  $\Delta t$  di campionamento del segnale, ovvero  $f_{\text{camp}} = 1/\Delta t_{\text{camp}}$ .



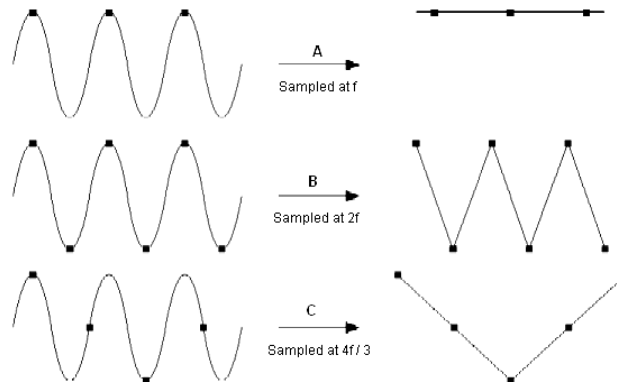
**Teorema di Nyquist (1928)**

**Al fine di non perdere informazioni:  $f_{\text{camp}} \geq 2 f_{\text{max}}$**

25

**Teorema di Nyquist (1928)**

**Al fine di non perdere informazioni:  $f_{\text{camp}} \geq 2 f_{\text{max}}$**



Esempio. In una strumentazione FT-IR la frequenza del segnale prodotto dall'interferometro di Michelson è  $f = 2\sigma v$ , dove  $\sigma$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) è il numero d'onda della specifica radiazione IR e  $v$  è la velocità dello specchio mobile.

Se lo spettro viene calcolato nell'intervallo  $400\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$  e  $v = 1 \text{ cm/s}$ , le frequenze dei segnali che compongono l'interferogramma saranno comprese nell'intervallo  $800\text{-}8000 \text{ Hz}$ . Quindi:

**$f_{\text{max}} = 8000 \text{ Hz}$ ,  $f_{\text{camp}} \geq 2 f_{\text{max}}$ ,  $f_{\text{camp}} \geq 16 \text{ kHz}$**

26

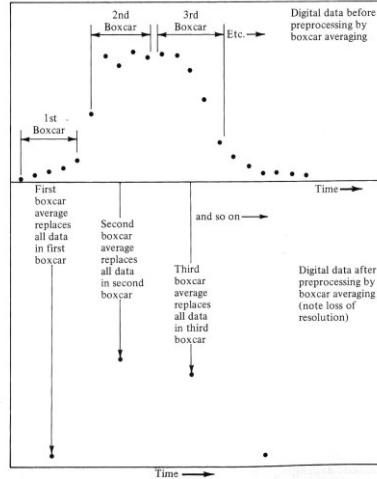
## Tecniche di riduzione del Rumore, filtri digitali

Attraverso l'elaborazione del segnale digitale è possibile migliorare S/N

### 1. Media boxcar

FIGURE 2.8

Digital data before and after preprocessing by boxcar averaging. [After G. F. Dulaney, *Anal. Chem.*, **47**, 27A (1975). Courtesy of the American Chemical Society.]



$$\left(\frac{S}{N}\right)_n = \sqrt{n} \left(\frac{S}{N}\right)_1$$

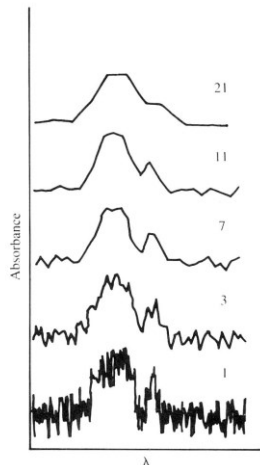
27

### 1. Media boxcar, esempi

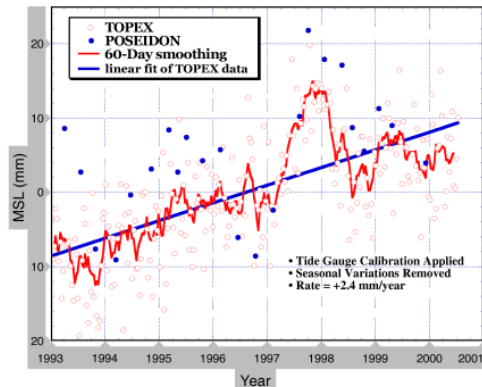
#### spettrofotometria UV-VIS

FIGURE 2.9

Effect of boxcar averaging on a simulated noisy spectrum. The number of points included in the boxcar is given at the right of each plot. [After R. Thompson, *J. Chem. Educ.*, **62**(10), 866 (1985). Courtesy of the *Journal of Chemical Education*.]



#### Misure da satellite dell'altezza del mare



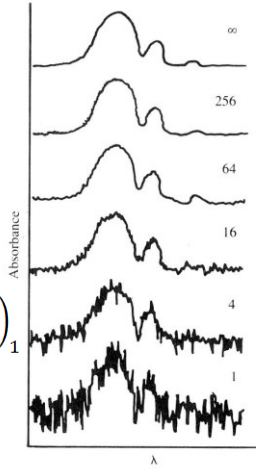
Variations in global mean sea level [Nerem, 1995a, 1995b; Nerem et al., 1999] from the TOPEX and POSEIDON altimeters after calibration. The dots show the 10-day sea level estimates, and the line is the same after smoothing with a 60-day boxcar filter.

28

## 2. Media per accumulato

FIGURE 2.10  
Effect of ensemble averaging on a simulated noisy spectrum. The number of times the signal was summed is given at the right of each plot. [After R. Thompson, *J. Chem. Educ.*, **62**(10), 866 (1985). Courtesy of the *Journal of Chemical Education*.]

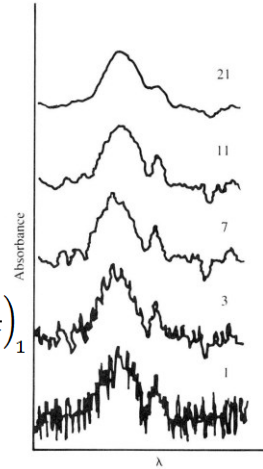
$$\left(\frac{S}{N}\right)_n = \sqrt{n} \left(\frac{S}{N}\right)_1$$



## 3. Boxcar mobile

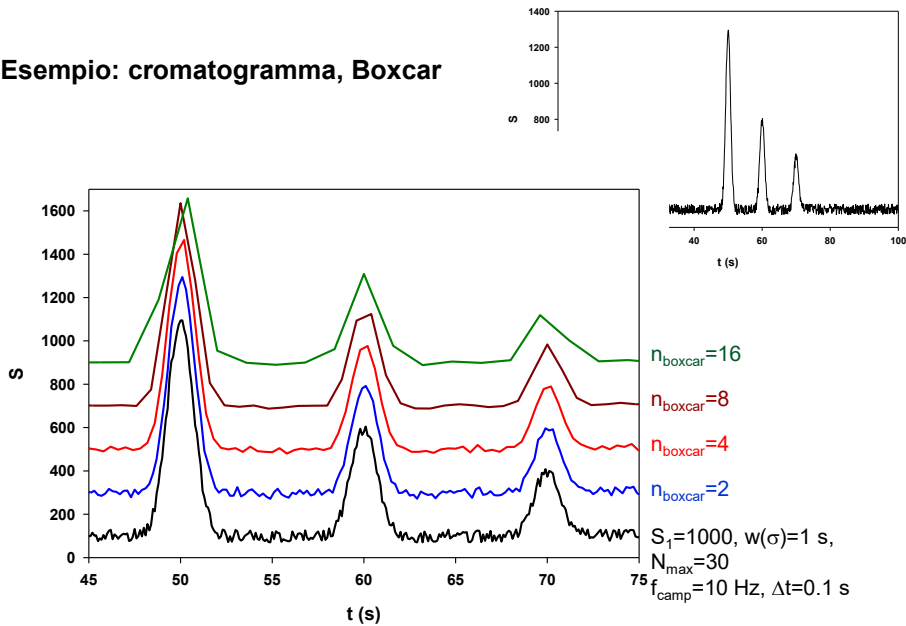
FIGURE 2.11  
Effect of a moving-average smooth on a simulated noisy spectrum. The number of points included in the smoothing function is given at the right of each plot. [After R. Thompson, *J. Chem. Educ.*, **62**(10), 866 (1985). Courtesy of the *Journal of Chemical Education*.]

$$\left(\frac{S}{N}\right)_n = \sqrt{n} \left(\frac{S}{N}\right)_1$$

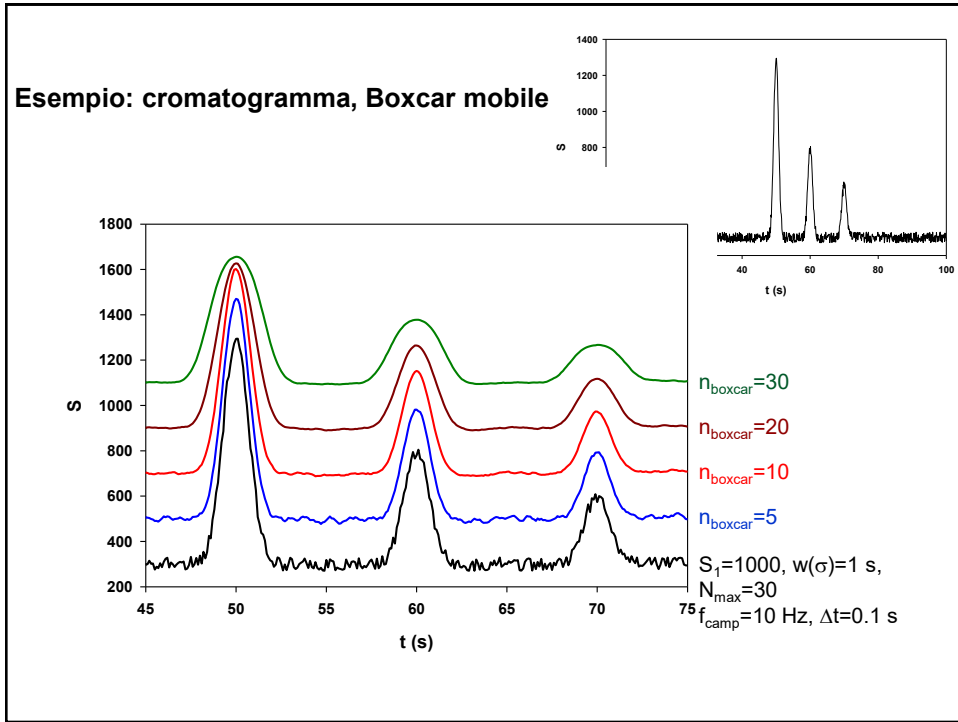


29

## Esempio: cromatogramma, Boxcar



30



31