

CAPITOLO 6

ACCENNI DI FISICA ED INGEGNERIA DEI SENSORI

Stefano D'Onghia - *Silicondev s.r.l.*

Giuseppe Lo Russo - *Silicondev s.r.l.*

Il fenomeno incendio visto come un corpo nero

Tutti i corpi in natura non solo emettono radiazione termica, ma allo stesso tempo la assorbono dall'ambiente circostante. Se un corpo è più caldo dell'ambiente in cui si trova, emette più radiazione termica di quanta ne assorba e tende a raffreddarsi sino a raggiungere una fase di equilibrio termico, condizione in cui le quote di assorbimento e di emissione di radiazione sono uguali; questa condizione, ovviamente non può essere mai raggiunta se viene fornita continuamente al corpo in osservazione energia termica dall'esterno, perché è sempre presente una variazione di temperatura tra il corpo e l'ambiente.

La radiazione emessa da un corpo caldo non dipende solo dalla sua temperatura, ma anche dal materiale di cui è costituito, dalla sua forma e dalla natura della sua superficie. All'aumentare della temperatura un corpo incandescente non emette solo nell'infrarosso, ma anche nel visibile; il colore predominante di un corpo incandescente si sposta dal rosso spento al giallo-arancio brillante, fino al tono bluastrò.

Lo studio della radiazione termica può essere trattato mediante un corpo irraggiante ideale, per il quale lo spettro della radiazione emessa dipende solo dalla temperatura del corpo; tale ipotesi sono pienamente soddisfatte dal **corpo nero**.

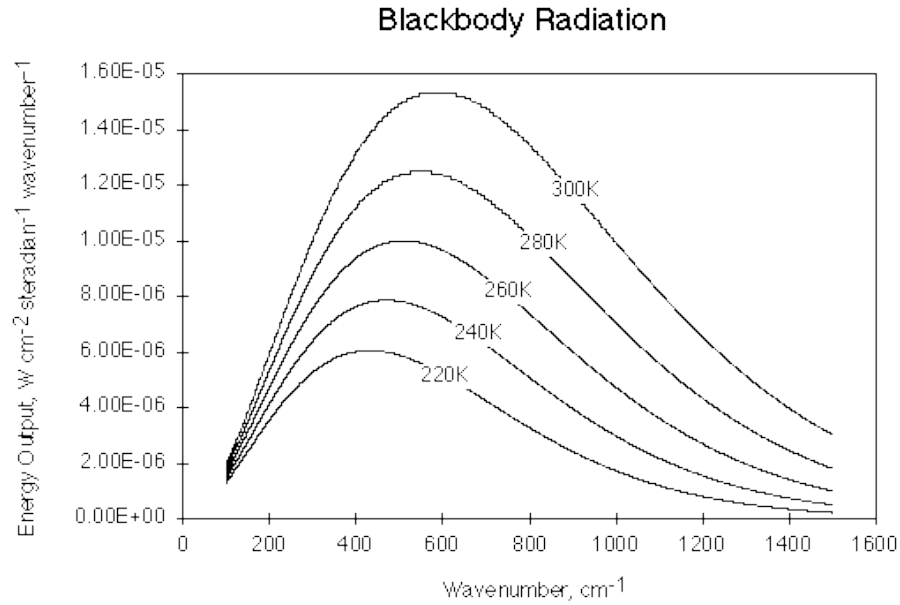


Figura 1 - Radianza spettrale del corpo nero cambiare disegno

La legge che meglio si accorda con la curva sperimentale riportata in **Errore**.

L'origine riferimento non è stata trovata., è la Legge di dell'irraggiamento di Planck.

$$W_{\lambda} = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

dove:

- W_{λ} = radianza spettrale, $[W \text{ cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}]$;
- h = costante di Planck = $(6.6256 \pm 0.0005) \times 10^{-34}$, $[W \text{ s}^2]$;
- k = costante di Boltzmann = $(1.38054 \pm 0.00018) \times 10^{-23}$, $[W \text{ s K}^{-1}]$;

c = velocità della luce nel vuoto = $(2.997925 \pm 0.000003) \times 10^{10}$, $[cm \text{ s}^{-1}]$.

Da tale legge, integrando lungo l'asse delle lunghezze d'onda si ottiene l'Intensità di irraggiamento per unità di superficie.

$$W = \frac{2 \pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$$

dove

- W = Intensità di irraggiamento $[W_{cm^{-2}}]$;
- σ = costante di Stefan-Boltzmann $= (5.6697 \pm 0.0029) \times 10^{-12} [W_{cm^{-2}} K^{-4}]$.

Tale relazione è meglio nota come Legge di Stefan-Boltzmann.

I corpi caldi reali presentano una minore intensità di irraggiamento rispetto al corpo nero; tale osservazione ci porta alla legge di Kirchoff sull'emittanza.

$$\varepsilon = \frac{W'}{W}$$

dove:

- ε = emittanza del materiale che assume valori ≤ 1 ;
- W' = intensità di irraggiamento di un corpo reale;
- W = intensità di irraggiamento del corpo nero.

L'emittanza rappresenta quindi, il grado di approssimazione del corpo nero.

Quindi un corpo reale è rappresentabile mediante una variazione della legge di Stefan-Boltzmann di seguito riportata.

$$W' = \varepsilon \sigma T^4$$

L'emittanza è funzione del tipo di materiale e della rugosità della superficie e può variare con la lunghezza d'onda e la temperatura della sorgente. E' possibile distinguere tre tipi di sorgenti in base alle variazioni spettrali dell'emittanza:

1. Un corpo nero o radiatore di Planck, per il quale $\epsilon(\lambda) = \epsilon = 1$.
2. Un corpo grigio, per il quale $\epsilon(\lambda) = \epsilon = \text{cost} < 1$.
3. Un corpo radiante selettivo, per il quale $\epsilon(\lambda)$ varia con la lunghezza d'onda.

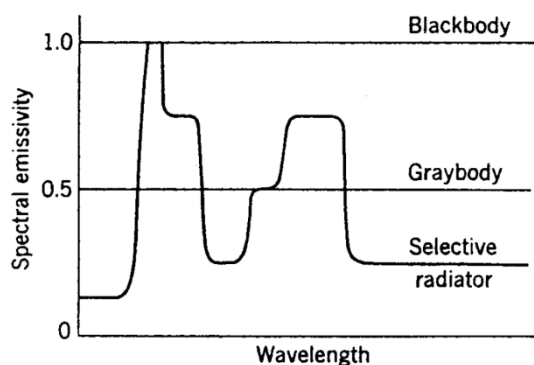


Figura 2 - Emittanza spettrale

Trasmissione del segnale IR nell'atmosfera

La propagazione della radiazione IR attraverso l'atmosfera è influenzato da processi di assorbimento e di diffusione (scattering) del segnale irradiato dalla sorgente.

Nel processo di assorbimento predomina l'assorbimento selettivo da parte dei gas costituenti permanenti nell'atmosfera quali CO₂, O₂ e vapore acqueo e, in minor misura, da parte dei contaminanti minoritari.

In aggiunta all'assorbimento, una frazione dell'energia radiante che transita attraverso l'atmosfera viene diffusa. Le modalità con cui avviene il processo di diffusione dipendono fortemente dalle dimensioni dell'oggetto scatterante rapportate alla lunghezza d'onda della radiazione incidente ed in genere

coinvolgono molecole d'aria o molecole di aerosol. A causa di questi processi di estinzione, la radiazione IR subisce un'attenuazione che segue un andamento esponenziale descritto dalla legge di Bourget-Lambert-Beer di seguito indicata

$$P = P_0 e^{-\sigma x}$$

dove

- P_0 = potenza entrante nel mezzo dispersivo;
- P = potenza residua dopo che il fascio di radiazione ha effettuato un percorso di lunghezza x ;
- σ = coefficiente di estinzione.

Condizioni Meteo	Visibilità	Coefficiente di estinzione [1/Km]
Nebbia densa	< 50 [m]	>78,2
Nebbia spessa	50 ÷ 200 [m]	78,2 ÷ 19,6
Nebbia moderata	200 ÷ 500 [m]	19,6 ÷ 7,82
Nebbia leggera	500 ÷ 1000 [m]	7,82 ÷ 3,91
Nebbia sottile	1 ÷ 2 [Km]	3,91 ÷ 1,96
Foschia	2 ÷ 4 [Km]	1,96 ÷ 0,94
Foschia leggera	4 ÷ 10 [Km]	0,94 ÷ 0,391
Limpido	10 ÷ 20 [Km]	0,391 ÷ 0,196
Molto limpido	20 ÷ 50 [Km]	0,196 ÷ 0,079
Eccezionalmente limpido	> 50 [Km]	> 0,078
Aria pura	277 [Km]	0,0141

Tabella 1 - Coefficienti di Estinzione

Il coefficiente σ , i cui valori nelle varie condizioni di visibilità sono riportati nella **Errore.**
L'origine riferimento non è stata trovata., rappresenta l'effetto combinato dei

processi di assorbimento e di scattering da parte dei gas e particelle e corrisponde quindi alla somma di due termini.

$$\sigma = \alpha + \gamma$$

dove

- α = coefficiente di assorbimento.
- γ = coefficiente di scattering.

L'assorbimento è di tipo continuo (caratteristico dei corpi solidi o liquidi incandescenti) o di tipo selettivo (a righe o a bande, caratteristico delle sostanze allo stato gassoso); nel caso di trasmissione in atmosfera l'assorbimento selettivo è il fenomeno predominante. Per quanto riguarda lo scattering si può dire che è un processo in cui una particella nell'interazione con un'onda elettromagnetica le sottrae una frazione di energia che irradia successivamente in ogni direzione. Le particelle atmosferiche responsabili dello scattering ricoprono un intervallo di dimensioni che varia da 10^{-8} [cm] (molecole di gas) a 1 [cm] (gocce di pioggia e grandine).

Il tipo di processo diffusivo che avviene dipende fortemente dal rapporto tra la lunghezza d'onda del fascio radiante e le dimensioni della particella atmosferica; è possibile distinguere i vari tipi di scattering in funzione di tale rapporto.

- Quando le dimensioni delle particelle sono molto inferiori alla lunghezza d'onda, si ha lo scattering di Rayleigh; a questo caso appartengono le molecole di piccole dimensioni, non assorbitive, a bassa densità. In questo contesto si ha dipendenza del coefficiente di scattering dall'inverso della lunghezza d'onda, espressa mediante la seguente formula:

$$\gamma \propto \lambda^{-4}$$

- Man mano che le dimensioni delle particelle si approssimano alla lunghezza d'onda incidente, diviene predominante lo scattering di Mie; di questo tipo sono i processi di diffusione che coinvolgono particelle di nebbia, fumo, smog e polvere, come pure quelli prodotti da aerosol e vapore acqueo. Il coefficiente di scattering, in questo caso, assume la seguente forma:

$$\gamma \propto \pi n K r^2$$

dove:

- K = parametro dipendente dal rapporto λ/r ,
- r = raggio della particella;
- n = numero di particelle esistenti per cm^3 .

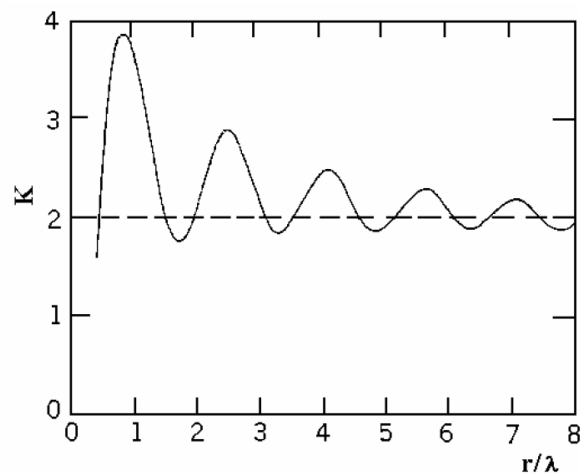


Figura 3 - Andamento del parametro K

Il tipo di aerosol che si trova in zone prossime al mare è molto diverso in composizione e distribuzione da quello di origine continentale. L'aerosol presente in zone marine è prodotto da evaporazione della schiuma del mare e da spruzzi e strati di goccioline contenenti particelle di sale le cui maggiori dimensioni causano un effetto di diffusione più accentuato. Quindi risulta significativa la differenza di trasmissione con un aerosol di

marino; a parità di altre condizioni, la trasmissione si riduce di un fattore $20 \div 50$ a secondo delle bande.

Di seguito si riportano i grafici che rappresentano la trasmittanza tipica su distanze di 10 Km, in piena estate per latitudine di 43° e visibilità di 5 Km considerando in assenza ed in presenza di aerosol marino.

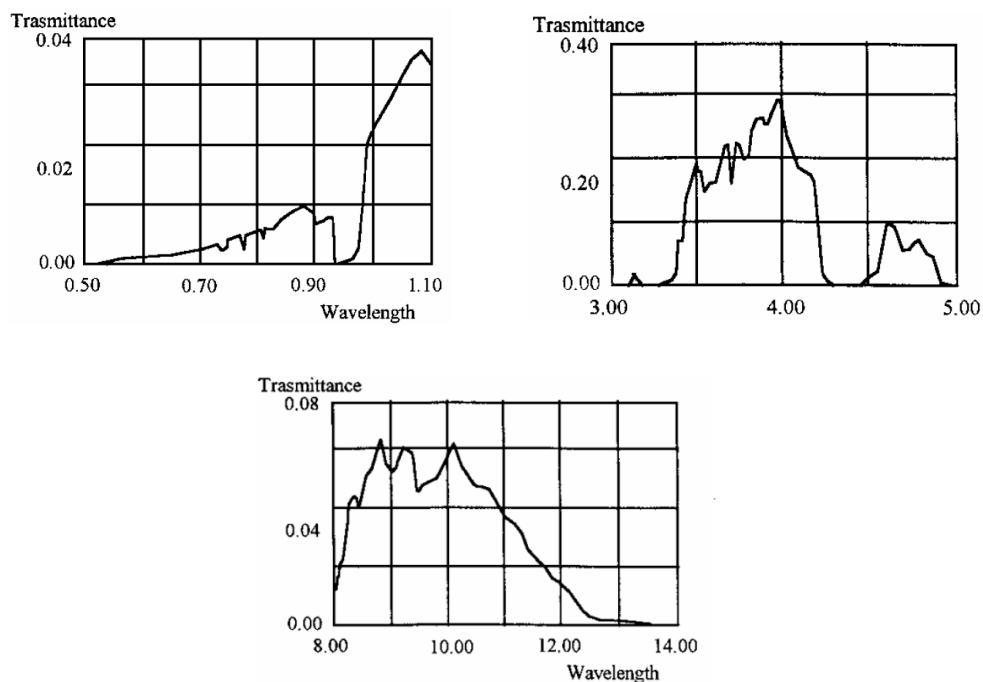


Figura 4 - Trasmittanza in assenza di aerosol marino

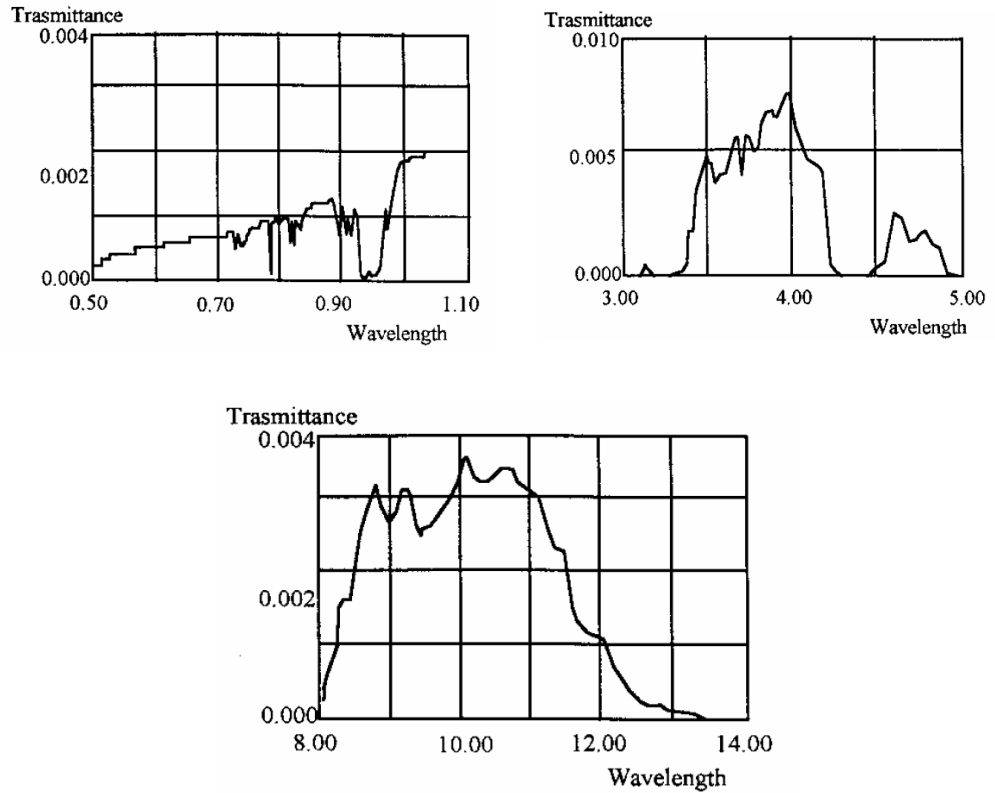


Figura 5 - Trasmittanza in presenza di aerosol marino

In aggiunta ai processi di assorbimento e scattering si deve considerare anche l'attenuazione di spazio libero.

$$\alpha_L \propto \frac{1}{4\pi r^2}$$

In conclusione in base a dati sperimentali si può dire che le componenti maggiormente responsabili dell'attenuazione del segnale IR sono:

- L'acqua con vari picchi di assorbimento tra 0.8 e 2 μm e una vasta zona tra 5.2 e 8 μm.
- L'anidride carbonica con picchi di assorbimento a 2.7, 4.3 e 15 μm.

Nella figura seguente si riportano i valori di trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda con evidenziazione delle molecole che causano i processi di attenuazione del segnale.

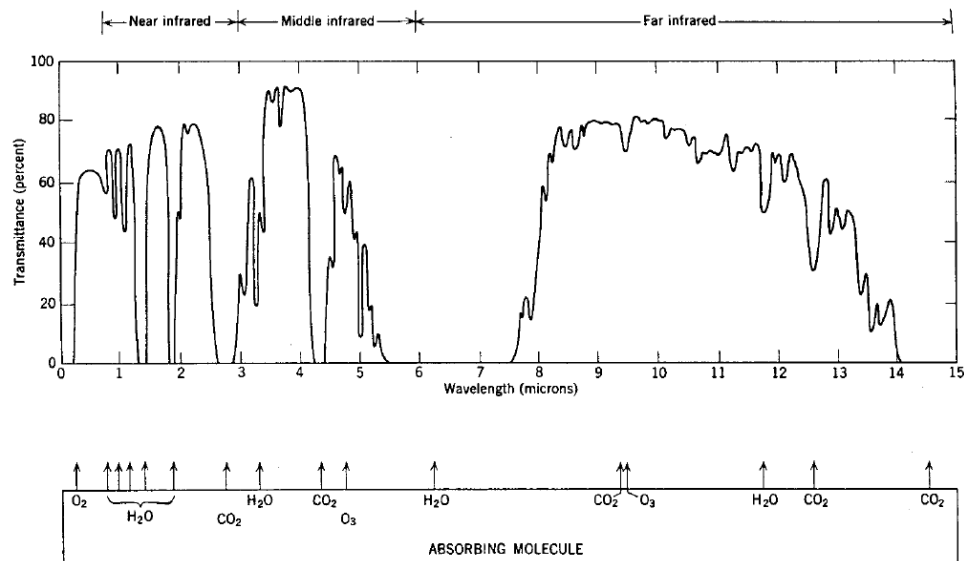


Figura 6 - Trasmittanza in atmosfera

Ingegneria dei sensori

Un sensore è un dispositivo in grado di rilevare una grandezza interagendo con essa: l'energia ricevuta dal sensore modifica lo stato della grandezza variando una delle sue proprietà (lunghezza, resistenza elettrica e così via). Il termine sensore è spesso utilizzato in luogo di trasduttore, il quale è invece più precisamente un dispositivo che converte una grandezza in un'altra di natura diversa. Poiché all'interazione con una grandezza è associata in genere anche l'operazione di conversione, si può definire sensore un dispositivo che acquisisce in ingresso una certa grandezza e ne fornisce in uscita una di natura differente, ma legata alla prima da una legge nota. La grandezza in uscita dal sensore, una volta elaborata da un opportuno sistema condizionatore, è inviata a uno strumento di misura detto strumento terminale, oppure a un sistema di controllo. Il

condizionatore fornisce una grandezza analogica, spesso convertita in una digitale di più facile trattamento ed elaborazione.

TIPOLOGIE E CLASSIFICAZIONE DEI SENSORI

I sensori possono essere classificati in base a diversi criteri; ad esempio sulla base del tipo di grandezza rilevata: meccanica (posizione, velocità, accelerazione, pressione, forza, deformazione, massa, densità, momento, vibrazioni ecc.); termica (temperatura, calore specifico, conducibilità termica ecc.); acustica (livello sonoro ecc.); elettrica (carica, intensità di corrente, tensione, resistenza elettrica ecc.); magnetica (intensità di campo, permeabilità ecc.); ottica; elettromagnetica.

Per quanto riguarda le grandezze elettriche e magnetiche si parla più propriamente di sonde, mentre per le grandezze ottiche ed elettromagnetiche piuttosto che all'ampiezza o alla frequenza delle onde si fa riferimento in genere all'intensità (si ricorre, a tale scopo, a celle fotoelettriche e a celle fotoconduttive, sensibili a radiazioni luminose, infrarosse e così via). Riguardo alle grandezze acustiche si utilizzano, tenuto conto della natura del suono, particolari sensori di vibrazioni. In definitiva con sensori di grandezze fisiche ci si riferisce soprattutto a sensori di grandezze meccaniche e termiche.

Nella tabella seguente sono riportate le principali classificazioni ed i criteri adottati:

Criterio	Sensori	Caratteristiche
Grandezza misurata	Di temperatura	Per misure di temperatura, calore specifico
	Di posizione	Per misure di distanza o presenza
	Di forza - pressione	Per misure di forza, coppia o pressione
	Di spostamento	Per misure di spostamento, velocità o accelerazione
	Di portata	Per misure di portata
	Ottici	Per misure di intensità luminosa
Principio di misura	Attivi	Hanno una propria sorgente di radiazione e non richiedono potenza dall'esterno per fornire il segnale in uscita

	Passivi	Non hanno sorgente propria di radiazione e richiedono potenza dall'esterno per fornire il segnale in uscita
Segnale di uscita	Analogici	Segnale in uscita continuo
	Digitali	Segnale in uscita binario

Lo studio dei sensori in base al principio di funzionamento e la classificazione di specifiche tipologie risulta più razionale anche con riferimento ai condizionatori a valle dei sensori, che vengono scelti proprio in base alle specifiche tipologie.

PARAMETRI CARATTERISTICI DEI SENSORI

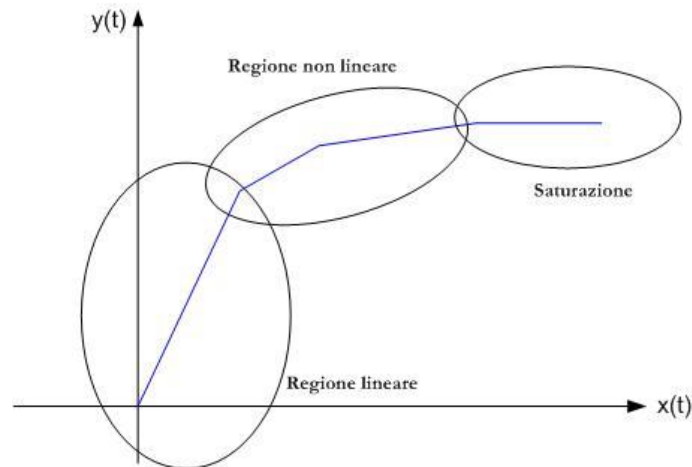
Curva di risposta

Un sensore è in generale costituito di una serie di elementi attraverso i quali la grandezza misurata (misurando) viene trasdotta in grandezze intermedie fino ad arrivare al segnale elettrico.

L'equazione generale che descrive il funzionamento di un sensore è:

$$y(t) = F(x(t))$$

dove $F(x(t))$ è la *curva caratteristica* o risposta ingresso-uscita che descrive il funzionamento del sensore e rappresenta il parametro fondamentale per caratterizzare un sensore.



La conoscenza della curva di risposta permette di usare il sensore come strumento di misura: dalla misura di $y(t)$ si evince una stima del misurando $x(t)$.

Il sensore ideale non solo ha un segnale di uscita $y(t)$ lineare, ma dovrebbe anche seguire istantaneamente il segnale di ingresso $x(t)$.

Il sensore reale ha un comportamento non ideale che produce una deviazione dell'uscita dal valore "vero". La differenza fra valore indicato e valore "vero" rappresenta l'errore del sensore.

Sensibilità

La sensibilità è definita come il rapporto tra la variazione della risposta del sensore e la variazione del misurando. Essa definisce la capacità del sensore di seguire le variazioni del misurando e rappresenta l'efficienza di trasduzione del sensore.. Matematicamente, si esprime come la derivata della curva di risposta del sensore.

$$S = \frac{dy}{dx}$$

Nella regione di non linearità, S è funzione del misurando. Nella regione di linearità S è massima e costante, perciò sono massime le prestazioni del sensore.

Range o campo di lavoro

E' l'intervallo dinamico di ingresso che può essere convertito dal sensore con una incertezza prestabilita. Rappresenta l'insieme dei valori della grandezza d'ingresso ai quali corrispondono valori affidabili della grandezza di uscita.

Offset

Rappresenta il segnale in uscita dal sensore anche in assenza del segnale di ingresso.

Risoluzione

Il sensore reale ha un comportamento non ideale che produce una deviazione dell'uscita dal valore "vero". La differenza fra valore indicato e valore "vero" rappresenta l'errore del sensore.

La risoluzione, pertanto, è il minimo segnale d'ingresso che può essere rilevato con sicurezza all'uscita del sensore.

Accuratezza

L'accuratezza di un sensore esprime il massimo scostamento tra la misura (o "lettura") fornita dal sensore ed il valore vero del misurando. E' solitamente espressa in percentuale del valore di fondo scala.

$$\epsilon f = 100 * \frac{X_m - X_v}{X_{FS}}$$

dove X_v valore vero del misurando, X_m valore misurato del misurando, dove X_{FS} valore di fondo scala.

Ripetibilità o precisione

E' la capacità di riprodurre la stessa uscita quando è applicato lo stesso ingresso, consecutivamente, nelle stesse condizioni operative e nella stessa direzione. Essa è intesa come massima differenza tra le uscite di più cicli di calibrazione.

Affidabilità

L'affidabilità è la capacità del sensore di espletare la funzione per cui è stato costruito in condizioni prestabilite e per un tempo fissato; questo parametro è espresso in termini statistici come la probabilità che il dispositivo funzioni senza guasti per un tempo o per un numero di cicli specificato.

Le caratteristiche di affidabilità in un sensore sono relazionate alla sua vita utile ed a possibili cause di mal funzionamento nel sistema in cui è inserito.

In particolare:

- la *vita operativa* di un sensore rappresenta il minimo intervallo di tempo (specificato) nel quale il dispositivo opererà senza che cambino le sue caratteristiche di funzionamento;
- il *numero di cicli* di un sensore rappresenta il minimo intervallo di escursioni nel suo range di funzionamento nel quale il dispositivo opererà senza che cambino le sue caratteristiche di funzionamento.

I SENSORI PER IL TELERILEVAMENTO

I sensori per il telerilevamento misurano l'energia riflessa dalle superfici dei vari oggetti con lo scopo di stabilire una corrispondenza tra la quantità ed il tipo di energia e la natura e lo stato dei corpi o delle superfici riflettenti dal quale questa energia proviene. Le proprietà riflettenti della superficie terrestre variano in funzione della lunghezza

d'onda, delle caratteristiche della superficie, dell'angolo di incidenza e dell'angolo di vista del sensore rispetto alla superficie.

I sensori per il telerilevamento, utilizzando la distinzione descritta nel capitolo precedente si classificano:

✓ in base al principio di misura in:

- *Sensori passivi*: non hanno sorgente propria di radiazione. Misurano radiazione riflessa/diffusa (VIS, NIR, MIR), emissione termica (MIR, ThIR, MW) o fluorescente (Radiometri, radiometri multispettrali, spettroradiometri);
- *Sensori attivi*: hanno una propria sorgente di radiazione (LIDAR, RADAR)

✓ in base alla tecnologia:

- *Sensori ottici*: VIS, NIR (camere fotografiche, fotogrammetriche);
- *Sensori elettro-ottici*: VIS e IR (videocamere, radiometri);
- *Sensori a microonde*: (radar altimetro, scatterometro, SLAR, SAR).

✓ in base al campionamento spettrale:

- *Radiometri multispettrali*: misurano in 2-10 bande spettrali
- *Radiometri iperspettrali*: misurano in 10-200 bande spettrali in genere contigue

✓ in base al prodotto:

- *Sensori "imaging"*: producono mappa parametri radiativo mediante tecnica scansione (Radiometro a scansione, SLAR, SAR)
- *Sensori non imaging* (Altimetro, radar meteo, sounder atmosferico)

- *Profiler*: misurano profilo verticale di una grandezza fisica

Le caratteristiche principali che permettono di valutare le prestazioni, i campi di applicazione e i metodi di utilizzo sono riassumibili in quattro proprietà:

- ✓ *risoluzione geometrica*: è costituita dalla cella di risoluzione a terra, ovvero dalla dimensione minima degli oggetti al suolo che si riescono a distinguere: essa dipende dall'IFOV (Instantaneous Field of View) e dalla distanza tra il sensore e l'oggetto;
- ✓ *risoluzione spettrale*: è l'ampiezza delle bande spettrali risolte dal sensore cioè la distanza tra le lunghezze d'onda medie di due bande d'acquisizione diverse; essa dipende dal numero e dall'ampiezza delle bande di acquisizione del sensore;
- ✓ *risoluzione radiometrica*: è la differenza minima d'intensità di energia raggianti che può essere registrata dal sensore; dipende sostanzialmente dal formato digitale in cui viene convertito il segnale ottico analogico;
- ✓ *risoluzione temporale*: è il tempo che intercorre tra due osservazioni successive della stessa area.