

UNITA' 6 – SOMMARIO

6. MISURE DI TEMPERATURA

6. MISURE DI TEMPERATURA A CONTATTO

- 6.1.1. Termocoppie
- 6.1.2. Termoresistenze
- 6.1.3. Termistori (NTC e PTC)

6.2. MISURE DI TEMPERATURA SENZA CONTATTO

- 6.2.1. Generalità
- 6.2.2. Sensori e rilevatori termici senza contatto
- 6.2.3. Pirometria
- 6.2.4. Termografia e sistemi (video)termografici
- 6.2.5. Stima dell'emissività superficiale e dispositivi dual-band/multiple band
- 6.2.6. Calibrazione degli strumenti di misura senza contatto: corpi neri di riferimento

6. MISURE DI TEMPERATURA A CONTATTO

Si trattano in questo capitolo i principali metodi e dispositivi di misura della temperatura, a contatto (nei quali il sensore viene accostato alla materia di cui si vuole misurare la temperatura, oppure inserito al suo interno).

6.1.1. Termocoppie

Vedi: Agilent Technologies, Practical Temperature Measurements – Application Note 290, <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7822E.pdf>

6.1.2. Termoresistenze

Vedi: Agilent Technologies, Practical Temperature Measurements – Application Note 290, <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7822E.pdf>

6.1.3. Termistori (NTC e PTC)

Vedi: Agilent Technologies, Practical Temperature Measurements – Application Note 290, <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7822E.pdf>

6.2. MISURE DI TEMPERATURA SENZA CONTATTO

Si trattano in questa capitolo i principali metodi e dispositivi di misura della temperatura senza contatto (in cui il sensore della materia misurata rileva l'emissione superficiale di radiazione elettromagnetica, proporzionale alla temperatura superficiale).

6.2.1. Generalità

Uno dispositivo di misura senza contatto consente di effettuare rilevazioni di temperatura superficiale senza dover essere accostato direttamente alla superficie monitorata. Ciò è vantaggioso in moltissime situazioni rispetto ad un sensore a contatto o ad immersione, per esempio quando si ha a che fare con corpi non facilmente avvicinabili, in movimento, elettricamente sotto tensione, a temperature talmente elevate da distruggere un sensore a contatto, oppure con dimensioni o altre caratteristiche della superficie misurata tali che l'accostamento di un sensore potrebbe alterare la misura o provocare danni. Inoltre, i moderni strumenti di misura senza contatto permettono frequenze di campionamento elevatissime, dell'ordine delle centinaia e anche delle migliaia di hertz, idonee quindi al monitoraggio di transitori termici particolarmente rapidi.

Le misure termiche senza contatto sono in generale di tipo passivo, dal momento che si va a misurare la radiazione elettromagnetica emessa dalla superficie dell'oggetto misurato, senza con ciò esercitare alcun tipo di interazione o sollecitazione significativa. Il livello dell'emissione è proporzionale alla temperatura della superficie in esame.

In linea di principio, la temperatura della superficie in esame potrebbe essere messa in relazione alla misura del suo potere emissivo, cioè della potenza termica complessivamente emessa dall'unità di superficie in tutto lo spettro dell'irraggiamento termico, attraverso la nota legge di Stefan-Boltzmann del corpo nero, ottenendo così la correlazione

$$E(\varepsilon, T) = \varepsilon E_n(T) = \varepsilon \sigma_0 T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{E}{\varepsilon}} \quad (8.3.1.1)$$

ove E è il potere emissivo (emisferico totale) della superficie considerata, E_n il potere emissivo (emisferico totale) di corpo nero alla stessa temperatura, ε è l'emissività (emisferica totale) della superficie, σ_0 la costante di Stefan-Boltzmann e T la temperatura termodinamica assoluta della superficie.

In realtà, la relazione precedente potrebbe essere sfruttata soltanto in un processo di misura eseguito nel vuoto. Infatti, l'aria atmosferica (e, più in generale, qualunque gas o altro mezzo interposto tra dispositivo di misura senza contatto e superficie misurata) non è perfettamente trasparente alla radiazione elettromagnetica termica, ma in alcune bande spettrali presenta un assorbimento anche molto accentuato, prossimo al 100% (vedi Fig. 8.3.1.A). Inoltre, dal momento che l'umidità è uno dei principali responsabili dell'imperfetta trasparenza dell'aria, lo spettro di trasmissione atmosferica può subire, rispetto a quello diagrammato in Fig. 8.3.1.A, variazioni sensibili nelle bande in cui il vapore acqueo (H_2O) fa maggiormente sentire il suo effetto. Lo stesso dicasi circa la presenza e la concentrazione, nell'atmosfera dell'ambiente di misura, di gas risultanti da processi di combustione o antropogenici come, ad

esempio, l’anidride carbonica (CO₂). Inoltre, gas ad alta temperatura possono presentare un’emissione propria significativa in alcune bande spettrali, che va a sovrapporsi a quella della superficie misurata.

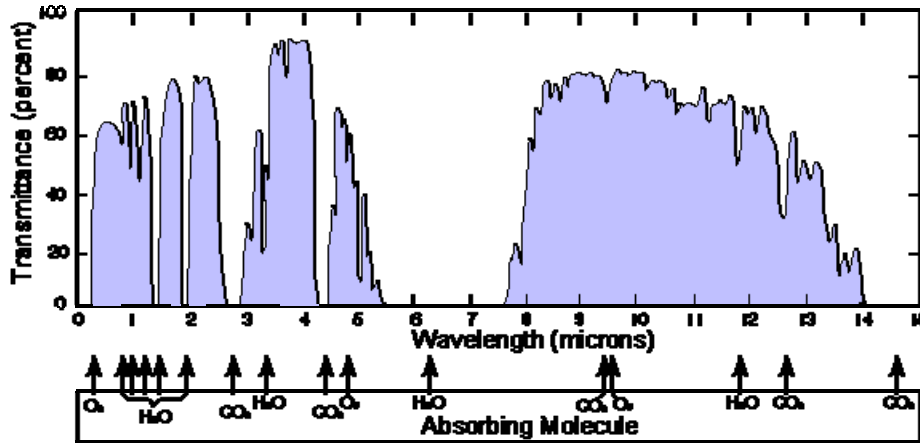


Figura 8.3.1.A. Spettro di trasmissione della radiazione elettromagnetica termica tipico dell’aria atmosferica [Infrared-Wikipedia].

Per i motivi precedentemente addotti, gli strumenti di misura senza contatto operano generalmente in finestre o bande spettrali relativamente ristrette, ad esempio 3-5 μm o 8-13 μm, nelle quali l’aria atmosferica si può assumere sostanzialmente trasparente alla radiazione elettromagnetica termica. Il potere emissivo superficiale misurato nella banda di misura viene confrontato con quello di un corpo nero, calcolabile integrando nella banda il potere emissivo monocromatico di corpo nero $E_{\lambda,n}$ descritto dalla legge di Planck del corpo nero:

$$E_{\lambda,n}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} \tag{8.3.1.2}$$

ove λ è la lunghezza d’onda, c_1 e c_2 sono due costanti.

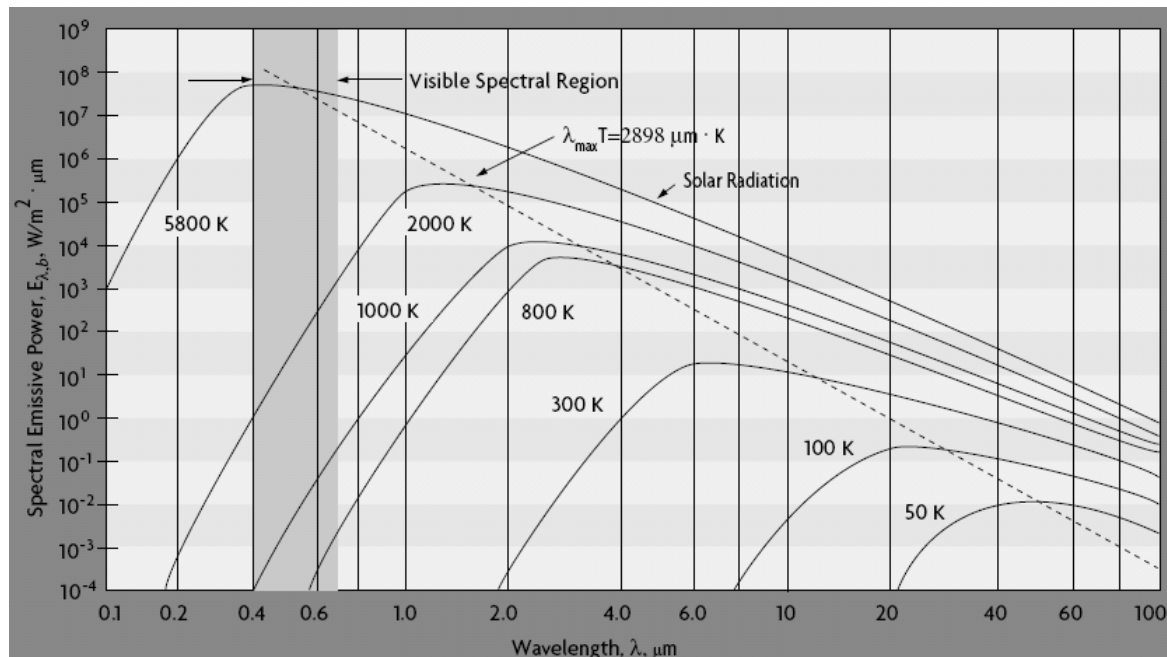


Figura 8.3.1.B. Potere emissivo monocromatico di corpo nero [Omega].

Diagrammando la legge di Planck su tutto lo spettro dell'irraggiamento termico e per differenti valori della temperatura (Fig. 8.3.1.B), si può innanzitutto rilevare che, a parità di lunghezza d'onda, esiste una relazione monotona crescente tra potere emissivo monocromatico e temperatura della superficie emittente. Lo stesso vale per l'integrale del potere emissivo in una banda spettrale assegnata. Si può inoltre rilevare che, essendo il potere emissivo di corpo nero sempre superiore a quello di una superficie reale alla stessa temperatura ed essendo concentrata nell'infrarosso ($\lambda > 0.76$) l'emissione elettromagnetica termica dei corpi neri a temperature ordinarie, deve essere pure concentrata nell'infrarosso l'emissione elettromagnetica termica dei corpi reali alle stesse temperature. È per questo motivo che la maggior parte dei dispositivi di misura senza contatto operano nell'infrarosso.

L'infrarosso è convenzionalmente suddiviso in diverse regioni, i cui contorni variano, con una certa soggettività, a seconda dell'ambito applicativo. Uno schema basato sulla risposta delle diverse tipologie di dispositivi di misura senza contatto ne prevede la suddivisione in cinque bande:

- Infrarosso vicino (in inglese near infra-red – NIR), da 0.7 a 1.0 μm (cioè circa dal termine del visibile fino al termine del range di risposta dei sensori al silicio)
- Infrarosso a onde corte (short-wave infra-red – SWIR), da 1.0 a 3 μm (dal termine del range di risposta dei sensori al silicio all'inizio della finestra atmosferica di trasparenza all'infrarosso a onde medie); coprono questa banda sensori ai sali di piombo (PbS, PbSe), mentre quelli all'arseniuro di indio-gallio (InGaAs) operano fino a circa 1.8-2.6 μm
- Infrarosso a onde medie (mid-wave infra-red – MWIR), da 3 a 5 μm (l'intervallo coperto dalla finestra atmosferica di trasparenza all'infrarosso a onde medie); operano in questa banda sensori all'antimoniuro di indio (InSb), al tellururo di mercurio-cadmio (HgCdTe) e al seleniuro di piombo (PbSe)
- Infrarosso a onde lunghe (long-wave infra-red – LWIR), da 8 a 12 μm (o anche da 7 a 14 μm , intervalli coperti dalla finestra atmosferica di trasparenza all'infrarosso a onde lunghe); operano in questa banda sensori al tellururo di mercurio-cadmio (HgCdTe), agli ossidi di vanadio (VO_x) e al silicio amorfo o policristallino

- Infrarosso a onde molto lunghe (very-long-wave infra-red – VLWIR), da 12 a circa 30 μm , banda in cui operano sensori al silicio variamente drogato

Assegnata una certa banda spettrale $\Delta\lambda = (\lambda_1, \lambda_2)$, il potere emissivo di una superficie nella banda, $E_{\Delta\lambda}$, è dato dall'integrale eseguito sulla banda stessa del potere emissivo monocromatico

$$E_{\Delta\lambda}(\varepsilon_{\Delta\lambda}, \Delta\lambda, T) = \varepsilon_{\Delta\lambda} E_{n,\Delta\lambda}(\Delta\lambda, T) = \varepsilon_{\Delta\lambda} \int_{\Delta\lambda} \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} d\lambda \quad (8.3.1.3)$$

ove $\varepsilon_{\Delta\lambda}$ è l'emissività (emisferica) nella banda in esame.

Una volta misurato il potere emissivo di una superficie nella banda operativa prescelta, ad esso è in linea di principio correlabile la temperatura della superficie stessa, a patto che sia nota l'emissività superficiale. La correlazione non viene però stabilita risolvendo rispetto alla temperatura la formula in eq. (8.3.1.3), ma è solitamente sviluppata per via sperimentale in forma di relazione polinomiale che, negli strumenti di misura che includono rilevatori di tipo fotonico (o quantico), correla la temperatura ad un segnale elettrico del sensore proporzionale al potere emissivo rilevato. In strumenti che includono rilevatori di tipo termico, la relazione polinomiale suddetta include un segnale proporzionale, anziché al potere emissivo rilevato, alla temperatura dei rilevatori dopo che questi sono stati riscaldati dalla radiazione elettromagnetica che gli viene focalizzata sopra. Maggiori dettagli sul funzionamento dei sensori fotonici e di quelli termici senza contatto sono forniti nei paragrafi seguenti, in particolare nel § 8.3.2.2.

6.2.2. Sensori e rilevatori termici senza contatto

Il componente più importante di uno strumento di misura senza contatto della temperatura è costituito dal sensore, preposto a ricevere la radiazione elettromagnetica termica emessa dalla superficie monitorata e raccolta dalle ottiche dello strumento. Il sensore produce così un segnale elettrico proporzionale all'intensità della radiazione ricevuta, che è a sua volta proporzionale alla temperatura della superficie emittente.

Si noti che al componente che effettivamente riceve la radiazione elettromagnetica termica e produce un segnale elettrico ad essa in qualche modo proporzionale si associa il nome di rilevatore (in inglese “detector”), mentre il sensore (“sensor”) è l'insieme, più o meno complesso, costituito dal rilevatore suddetto (che può essere fisso o mobile e anche multiplo, in forma di matrice mono- o bi-dimensionale di rilevatori) e da tutti i componenti accessori (supporti, circuiteria elettrica, filtri, specchi ed altri dispositivi ottici fissi o mobili, apparati di controllo della temperatura, ecc.) che con il rilevatore vanno di fatto a costituire un corpo unico. Nel seguito si seguirà questa distinzione.

La conversione del segnale elettromagnetico termico in un segnale elettrico può essere conseguita con una varietà piuttosto ampia di approcci realizzativi, basati su differenti processi fisici e su diversi materiali del rilevatore (solitamente semiconduttori). Una classificazione dei vari tipi di rilevatore è pertanto ardua, potendo essere svolta su diverse basi, spesso sovrapponibili:

- Modalità di conversione del segnale misurato
- Temperatura operativa del rilevatore: sensori raffreddati e non raffreddati

- Banda operativa
- Materiale del rivelatore
- Modalità di utilizzo del rivelatore: sensori fissi con singolo rivelatore, sensori a scansione (lineare, circolare o bidimensionale), sensori a matrice di rivelatori

8.3.2.1. Modalità di conversione del segnale e raffreddamento del rivelatore

I rivelatori senza contatto possono essere suddivisi in alcune tipologie fondamentali:

- Rivelatori fotonici (“photon detector”)
- Rivelatori termici (“thermal detector”)
- Rivelatori piroelettrici (“pyroelectric detector”)

Un rivelatore fotonico restituisce un segnale elettrico come diretta conseguenza della radiazione elettromagnetica rilevata, che è costituita da un flusso di fotoni, cioè di quanti di energia elettromagnetica. L'assorbimento di fotoni può avere come risultato l'emissione di elettroni, oppure il salto di banda di elettroni all'interno di un semiconduttore. Il segnale dei rivelatori fotonici è generalmente proporzionale al numero di fotoni ricevuti piuttosto che all'energia dei fotoni stessi.

Una comune classificazione dei rivelatori fotonici ne contempla due categorie principali:

- Rivelatori fotoconduttivi (“photoconductive detector”), basati sulla fotogenerazione di portatori di carica (elettroni, vacanze, coppie elettrone-vacanza) che vanno ad aumentare la conduttività elettrica del materiale del rivelatore
- Rivelatori fotovoltaici o fotodiodi (“photovoltaic detector” o “photodiode”), in cui coppie elettrone-vacanza fotogenerate vengono separate da una barriera interna di potenziale con un campo elettrico integrato (ottenuta mediante una giunzione p-n o una barriera Schottky), producendo così una corrente

Un'ulteriore classificazione dei rivelatori fotonici li vede distinguibili in:

- Rivelatori intrinseci, nei quali la foto-transizione avviene attraverso il gap di banda (bandgap) fondamentale del materiale semiconduttore
- Rivelatori estrinseci, in cui la foto-transizione avviene verso la banda di conduzione, oppure verso quella di valenza, a partire da livelli energetici introdotti da impurità
- Rivelatori QWIP (quantum well infrared photoconductor), dispositivi fotoconduttivi in cui, alternando strati di materiali semiconduttori con diversa bandgap, ad esempio arseniuro di gallio (GaAs) e arseniuro di alluminio-gallio (AlGaAs), si realizzano “buche” di potenziale in grado di confinare a livelli energetici prestabiliti i portatori di carica fotogenerati

In generale, i rivelatori fotonici richiedono di essere raffreddati a bassissima temperatura per ottenere una adeguata sensibilità. Senza scendere in dettagli inerenti la fisica elettronica, si può usare una metafora e dire che svolgere una misura senza contatto con un rivelatore raffreddato anziché con uno non raffreddato è come guardare di notte fuori da una finestra con la luce della stanza da cui si guarda spenta anziché accesa. Inizialmente e fino a non molto tempo fa, il raffreddamento è stato ottenuto soprattutto tramite vaporizzazione di azoto liquido (a 77 K) o anche di elio liquido (4 K), oppure mediante espansione di argon (Ar) o altri gas. Per alcuni tipi di rivelatori in HgCdTe operanti in banda 3-5 μm è stato anche possibile utilizzare refrigeratori termoelettrici ad effetto Peltier (operanti a temperature intorno a 200 K). Attualmente (2007), la maggior parte dei sistemi di misura raffreddati integra apparati di refrigerazione multistadio a ciclo Stirling.

Un importante vantaggio dei rilevatori fotonici è dato dal ridottissimo tempo di risposta, cioè il tempo necessario a che venga raccolta una quantità di energia elettromagnetica sufficiente a fornire un accettabile rapporto segnale-rumore. In virtù di tempi di risposta dell'ordine del microsecondo, sono oggi commercialmente disponibili dispositivi con frequenze di acquisizione pari anche a svariate decine di migliaia di campionamenti al secondo.

Un rilevatore termico restituisce un segnale elettrico essenzialmente proporzionale alla sua temperatura, che è conseguenza del riscaldamento apportato dalla radiazione elettromagnetica emessa dalla superficie monitorata, che viene intercettata dalle ottiche e focalizzata sul rilevatore. Un tipico rilevatore termico, dopo un transitorio relativamente breve in virtù della ridotta inerzia, raggiunge una condizione di equilibrio in cui la potenza termica ricevuta sotto forma di radiazione elettromagnetica, sommata a quella pressoché costante prodotta per effetto della circolazione di corrente nel rilevatore (effetto Joule), eguaglia la potenza termica ceduta per conduzione e, eventualmente, convezione e irraggiamento ad un "heat sink" ("pozzo termico") costituito dal supporto o anche dall'involucro del rilevatore, con il quale è posto in contatto per mezzo, ad esempio, di una membrana in materiale poco conduttivo del calore. Maggiore è la radiazione elettromagnetica ricevuta, più alta è la temperatura di equilibrio del rilevatore. Condizioni di equilibrio termico devono essere raggiunte ad ogni ciclo di acquisizione.

Un sensore termico, cioè un sensore integrante un rilevatore termico, è essenzialmente costituito da un elemento che assorbe la radiazione elettromagnetica rilevata, un rilevatore termico che misura la propria temperatura dopo essere stato riscaldato dalla radiazione assorbita, un heat sink a temperatura nota e eventualmente stabilizzata ed una membrana o altro elemento che isola termicamente il rilevatore dall'heat sink. L'elemento assorbitore ed il rilevatore possono fare corpo unico o anche coincidere.

I rilevatori termici possono essere classificati in base al segnale elettrico prodotto. In particolare, un rilevatore può essere di tipo:

- (micro)bolometrico, il più diffuso in sistemi low-cost, in cui la resistenza elettrica del materiale utilizzato (solitamente un semiconduttore come l'ossido di vanadio, il silicio amorfo o il silicio policristallino) varia con la temperatura
- termoelettrico, o a termocoppia, o a termopila ("thermoelectric/thermocouple/thermopile detector"), in cui sono presenti una o più giunzioni tra elementi di due diversi materiali che formano un circuito (aperto), ove si manifesta una tensione proporzionale alla temperatura delle giunzioni (effetto Seebeck)

All'equilibrio, il livello del segnale elettrico S_{det} restituito da un rilevatore termico, proporzionale alla sua temperatura o alla differenza di temperatura tra rilevatore e heat sink, è direttamente correlato all'energia istantaneamente trasmessa all'heat sink, uguale alla somma dell'energia elettromagnetica istantaneamente emessa dalla superficie monitorata e focalizzata dalle ottiche sul rilevatore e, ove significativa, dell'energia termica istantaneamente prodotta internamente al rilevatore per effetto Joule. In linea di principio, vale la relazione seguente

$$S_{det} \propto T_{det} - T_{sink} = \frac{1}{R_{sink}} \dot{E}_{sink} \equiv \frac{1}{R_{sink}} (\dot{E}_{rad} + \dot{E}_{joule}) \quad (8.3.2.1)$$

ove R_{sink} è la resistenza alla trasmissione del calore tra rilevatore e heat sink. La relazione può essere risolta rispetto alla potenza radiante rilevata, \dot{E}_{rad} , dalla quale si può poi ricavare la temperatura superficiale della sorgente emittente tramite la legge di Planck del corpo nero.

Tale conversione del segnale elettrico in un valore di temperatura superficiale viene attuata nei pirometri e negli strumenti termografici cosiddetti radiometrici, mentre negli strumenti non radiometrici, impiegati in applicazioni quali la videosorveglianza notturna e l'individuazione di perdite idrauliche o di anomalie termiche in apparati elettrici, le immagini termiche sono di tipo esclusivamente qualitativo e sono costruite sulla base del livello di segnale elettrico misurato, S_{det} .

In effetti, la relazione di conversione segnale elettrico-temperatura non è ricavata analiticamente, ma è espressa da relazioni di tipo polinomiale implementate in software nell'elettronica di controllo, i cui coefficienti sono solitamente ottenuti empiricamente per calibrazione diretta (vedi § 8.3.6). A titolo di esempio, la relazione impiegata nella termocamera Avio TVS-500, valida per misure su una superficie nera, presenta la seguente forma:

$$S_{det} = f(T) = A_0 + A_1 \cdot T + A_2 \cdot T^2 + A_3 \cdot T^3 + A_4 \cdot T^4 \quad (8.3.2.2)$$

La relazione può essere invertita, ottenendo una formula del tipo:

$$T = g(s) = B_0 + B_1 \cdot s + B_2 \cdot s^2 + B_3 \cdot s^3 + B_4 \cdot s^4 \quad (8.3.2.3)$$

ove $s = (S_{det})^{1/4}$. In caso di misure su una superficie non nera con emissività ε in presenza di una temperatura dell'ambiente di misura T_{amb} nota, il segnale S_{det} emesso dal rilevatore risente sia dell'emissione propria della superficie monitorata, sia della radiazione ambientale riflessa dalla superficie stessa verso il rilevatore:

$$\dot{E}_{rad} = \dot{E}_{surf} + \rho \cdot \dot{E}_{amb} \equiv \varepsilon \cdot \dot{E}_{surf,b} + (1 - \varepsilon) \cdot \dot{E}_{amb,b} \quad (8.3.2.4)$$

ove \dot{E}_{surf} e $\dot{E}_{surf,b}$ sono, rispettivamente, la potenza radiante che il rilevatore riceve dalla superficie monitorata e quella che riceverebbe se la superficie fosse nera, mentre $\dot{E}_{amb,b}$ è la massima potenza radiante ambientale riflessa dalla superficie verso il rilevatore, ρ è il coefficiente di riflessione della superficie (il quale, se la superficie è opaca, è il complementare ad uno del coefficiente di assorbimento, sua volta circa uguale all'emissività in condizioni in cui si possa assumere valida la legge di Kirchhoff). Dalla relazione precedente si può desumere la seguente correzione del segnale del sensore:

$$S_{det,corr} = \frac{S_{det} - S_{amb}}{\varepsilon} + S_{amb} \quad (8.3.2.5)$$

ove S_{amb} è ottenuto assumendo nera la radiazione ambientale ed introducendo nell'eq. (8.3.2.2) la temperatura ambiente T_{amb} , rilevata da un sensore integrato nello strumento di misura oppure assegnata dall'operatore. Il valore $S_{det,corr}$ può essere infine introdotto nell'eq. (8.3.2.3) per determinare la temperatura della superficie monitorata. Relazioni analoghe all'eq. (8.3.2.5) sono impiegate anche in sensori di tipo fotonico.

I rilevatori termici non richiedono in generale un apparato di raffreddamento criogenico, ma solo (e non necessariamente) un apparato di stabilizzazione della temperatura dell'heat sink, generalmente di tipo termoelettrico ad effetto Peltier. Il loro tempo di risposta, dell'ordine del

millisecondo, è più lungo di quello dei sensori che integrano rilevatori fotonici poiché è che la temperatura del rilevatore raggiunga ad ogni acquisizione una condizione di equilibrio termico. Inoltre, le periodiche operazioni di stabilizzazione della temperatura dell'heat sink, necessarie per compensare le derive termiche causate dall'energia ricevuta con la radiazione elettromagnetica e da quella prodotta per dissipazioni elettriche nei rilevatori, possono provocare, durante i transitori termici, fluttuazioni (solitamente a dente di sega) della temperatura misurata.

Nei rilevatori piroelettrici ("pyroelectric detector") piccole variazioni della radiazione elettromagnetica ricevuta causano il rilascio di cariche elettriche. Il rilevatore non ha bisogno di raggiungere l'equilibrio termico quando la temperatura misurata cambia, dal momento che esso risponde a variazioni nella radiazione elettromagnetica ricevuta.

8.3.2.2. Banda (finestra) operativa, materiali, filtri ed ottiche

In linea di principio, un rilevatore di temperatura senza contatto, sia di tipo fotonico che termico, restituisce un segnale proporzionale a tutta la radiazione elettromagnetica ricevuta. Tuttavia, solo una parte della radiazione elettromagnetica emessa dalla superficie misurata viene generalmente focalizzata sui rilevatori, in quanto è conveniente filtrare la radiazione che ricade in bande spettrali (finestre) in cui i rilevatori stessi presentano una risposta non particolarmente soddisfacente (in termini di rapporto segnale-rumore), oppure in cui si può avere una sensibile e scarsamente prevedibile influenza della trasmissività atmosferica. Le principali finestre utili a tal scopo sono quelle 3-5 μm (MWIR) e 7-14 μm (LWIR, spesso ridotta a 8-13 o 8-12 μm). Sono impiegabili anche finestre a lunghezza d'onda più corta come, ad esempio, quelle 1.5-1.8 μm e 2.2-2.4 μm (entrambe nello SWIR). Si noti che, per ridurre l'influenza della trasmissività atmosferica o per applicazioni particolari è abbastanza comune l'impiego di sotto-finestre relativamente strette dello SWIR, del MWIR o del LWIR, ma ciò riduce il contenuto energetico della radiazione elettromagnetica rilevata e può avere un impatto negativo sul rapporto segnale-rumore, da compensare con un'adeguata elettronica di amplificazione e conversione del segnale.

Va rilevato che, per superfici a temperatura ambiente o poco superiore, è pressoché nulla la radiazione emessa in finestre ad onda molto corta (nel NIR e nello SWIR), che quindi sono meglio sfruttabili per misure su superfici a temperatura elevata. Inoltre, nel caso si voglia effettuare la misura attraverso una fiamma, è necessario selezionare uno strumento di misura operante in una finestra o una sottofinestra in cui sono minimi l'assorbimento e l'emissione propri dei gas combusti (H_2O , CO_2) e dell'eventuale particolato.

In funzione sia della finestra che si vuole sfruttare, sia del tipo di rilevatore desiderato (fotonico, termico, piroelettrico), va selezionato il materiale del rilevatore, che nei moderni dispositivi è generalmente costituito da un semiconduttore. Un quadro (non esaustivo) dei materiali attualmente in uso è dato in Tab. 8.3.2.A.

I semiconduttori più usati per i rilevatori fotonici sono l'antimoniuro di indio (InSb) per la finestra 3-5 μm ed il mercururo di tellurio e cadmio (HgCdTe o MCT) sia per la finestra 3-5 μm che per quella 7-14 e loro sottofinestre. Tali materiali richiedono generalmente il raffreddamento criogenico del rilevatore a temperature dell'azoto liquido. Materiali utilizzati per misure in finestre a lunghezza d'onda più corta sono il solfuro di piombo, il seleniuro di piombo e il siliciuro di platino. Per rilevatori di tipo QWIP sono solitamente utilizzate strutture di arseniuro di gallio ed arseniuro di alluminio e gallio (GaAs/AlGaAs).

Tabella 8.3.2.A. Materiali utilizzati nei rilevatori IR [Infrared Detector, ...].

<i>Materiale</i>	<i>Materiale (nome italiano)</i>	<i>Simbolo (acronimo)</i>	<i>Sensori (tipo)</i>	<i>Banda spettrale (μm)</i>
Gallium arsenide/ Aluminum gallium a.	Arseniuro di gallio/ A. di alluminio-gallio	GaAs/AlGaAs	QWIP (fotoconduttivo)	3-20
Germanium	Germanio	Ge	fotovoltaici	0.8-1.7
Indium arsenide	Arseniuro di indio	InAs	fotovoltaici	1-3.8
Indium antimonide	Antimoniuro di indio	InSb	fotoconduttivi fotovoltaici	1-6.7 1-5.5
Indium gallium arsenide	Arseniuro di indio- gallio	InGaAs	fotovoltaici	0.7-2.6
Platinum silicide	Siliciuro di platino	PtSi	fotovoltaici	1-5
Lead sulfide	Solfuro di piombo	PbS	fotoconduttivi	1-3.2
Lead selenide	Seleniuro di piombo	PbSe	fotoconduttivi	1.5-5.2
Lithium tantalate	Tantalato di litio	LiTaO ₃	pireoletttrici	
Mercury cadmium telluride	Tellururo di mercurio- cadmio	MCT, HgCdTe	fotoconduttivi fotovoltaici	2-25
Mercury zinc telluride	Tellururo di mercurio- zinco	MZT, HgZnTe	fotoconduttivi fotovoltaici	
Silicon (amorphous, polycrystalline)	Silicio (amorfo, policristallino)	Si, Si-a, Si-pc	microbolometrici	8-14
Vanadium oxyde	Ossido di Vanadio	VO _x	microbolometrici	8-14
		FeO	ferroeletttrici	

I semiconduttori di più largo impiego per i rilevatori termici sono oggi l'ossido di vanadio (VO_x) e il silicio amorfo o policristallino. Entrambi i tipi non richiedono di raffreddare il rilevatore, ma solo di stabilizzare la temperatura dell'heat sink a cui il rilevatore è collegato (vedi § 8.3.2.1). Sono anche in commercio rilevatori (al silicio) che non richiedono neppure la stabilizzazione della temperatura, al prezzo di un lieve scadimento delle prestazioni.

Per trasmettere al rilevatore solo la radiazione elettromagnetica che ricade nella finestra spettrale utilizzata si fa impiego di filtri, ad esempio basati su processi di interferenza. Sono commercialmente disponibili filtri per tutte le bande spettrali corrispondenti a finestre atmosferiche, nonché filtri a banda più larga o più stretta.

Le telecamere operanti nell'infrarosso, similmente a quelle operanti nel visibile, possono essere corredate di ottiche atte ad ottenere la distanza focale ed il campo di vista desiderati. È generalmente possibile montare obiettivi di tipo microscopico, telescopico o grandangolare. Tuttavia, per tali obiettivi non possono essere utilizzati i materiali vetrosi e plastici impiegati per gli obiettivi delle telecamere video, essendo essi trasparenti alla luce visibile ma, in generale, opachi per la radiazione infrarossa nelle bande spettrali più sfruttate dai sistemi termografici. Ad esempio, il vetro di silice è trasparente, oltre che nel visibile, solo nell'infrarosso vicino (Fig. 8.3.2.A), perciò è utilizzabile per le ottiche di sistemi termografici operanti in banda NIR (sfruttabili per misure ad alta temperatura), ma è opaco nell'infrarosso medio e lontano, quindi non può essere impiegato per sistemi operanti in banda MWIR e LWIR (i più adatti a misure a temperatura ambiente o poco superiore). Materiali trasparenti in banda "mid-wave" e short-wave" (Fig. 8.3.2.A) sono però molto complessi da raffinare e plasmare, con la conseguenza che l'obiettivo di un sistema termografico può presentare un costo di fabbricazione assai elevato, anche prossimo al 50% del costo dell'intero sistema. Il

recente avvento di apparati termografici low-cost è stato reso possibile anche dall'individuazione di nuovi e più economici materiali per le ottiche, ad esempio a base polimerica.

...

Figura 8.3.2.A. Spettri di trasmissione del vetro di silice (SiO_2) e di silicio (Si), germanio (Ge), seleniuro di zinco (ZnSe), fluoruro di bario (BaF_2) [...].

Va peraltro rilevato che le ottiche di strumenti termografici simili ma operanti in bande spettrali diverse non sono generalmente intercambiabili, poiché materiali perfettamente trasparenti in una banda raramente sono tali nelle altre (Fig. 8.3.2.A).

Con i medesimi materiali utilizzati per le ottiche è possibile realizzare semplici finestre trasparenti nell'infrarosso, utili a realizzare accessi ottici di ispezione mediante termocamera su vani chiusi da pareti altrimenti opache. Applicazioni tipiche sono quelle delle misure in camera di combustione, delle misure in laboratorio durante esperimenti sotto vuoto o con atmosfera controllata, oppure dell'ispezione termica di quadri elettrici sigillati.

8.3.2.3. Modalità di utilizzo del rilevatore

Il sensore più semplice che si può realizzare è costituito da un singolo rilevatore, che osserva un angolo solido fisso rispetto allo strumento in cui è inserito. I pirometri, dispositivi per misure puntuali di temperatura (vedi § 8.3.3), nella loro configurazione più elementare sono formati da un sensore a singolo rilevatore, dalle connessioni elettriche per trasmissione del segnale misurato e, eventualmente, da un involucro di protezione.

I primi dispositivi termografici, in grado di misurare la temperatura su una linea o su una superficie, integravano sensori cosiddetti a scansione. Tali sensori sono essenzialmente costituiti da un rilevatore fisso e da uno specchio mobile, azionato meccanicamente o magneticamente e solitamente rotante attorno ad uno o due assi (Fig. 8.3.2.B). Lo specchio mobile ha la funzione di riflettere sul rilevatore la radiazione elettromagnetica ricevuta in un piccolo angolo solido di dimensioni assegnate, ma che varia continuamente di orientazione per effetto del movimento dello specchio.

...

Figura 8.3.2.B. Sensore a scansione con specchio rotante [...].

Sensori a scansione in cui lo specchio ruota attorno ad un solo asse, descrivendo un angolo o anche una rotazione completa, sono di tipo "line-scanner" (a scansione su una linea). Se puntati su una superficie, la rotazione dello specchio consente di variare la porzione di superficie istantaneamente misurata (quella sottesa all'angolo solido istantaneamente monitorato) solo lungo una linea, permettendo così di rilevare lungo la linea suddetta l'emissione elettromagnetica superficiale e, quindi, la temperatura della superficie.

Se la superficie misurata è in moto relativo rispetto ad un sensore "line-scanner" in direzione ortogonale alla linea di scansione (ad esempio, se il sensore è puntato sul terreno sotto ad un velivolo in avanzamento rettilineo, o sul nastro trasportatore di un processo in linea), l'acquisizione di linee in rapida successione consente di determinare la distribuzione di temperatura lungo una striscia della superficie. In assenza di moto relativo, lo stesso effetto può essere ottenuto facendo ruotare lo specchio su un secondo asse, ortogonale a quello che

consente la scansione lineare. In questo modo, oltre a variare lungo una linea la porzione di superficie misurata, cambia continuamente anche la linea di misura. Per effetto dei due distinti movimenti di rotazione dello specchio rotante, i sensori a scansione bidimensionale consentono di misurare la radiazione elettromagnetica emessa e, quindi, la temperatura su tutte le superfici sottese all'angolo solido complessivamente monitorato.

In relazione al funzionamento dei sensori a scansione è possibile definire i concetti di “instantaneous field of view” (IFOV) e di “field of view” (FOV). Il primo è l'angolo solido monitorato dal rilevatore ad un dato istante del processo di scansione, corrispondente all'acquisizione di un pixel di un'immagine termica, mentre il secondo è l'angolo solido complessivamente monitorato nell'arco di tutto il processo di scansione mono- o bi-dimensionale. Sia l'IFOV che il FOV nativi del sensore possono essere modulati tramite l'ottica dello strumento termografico in cui il sensore è integrato.

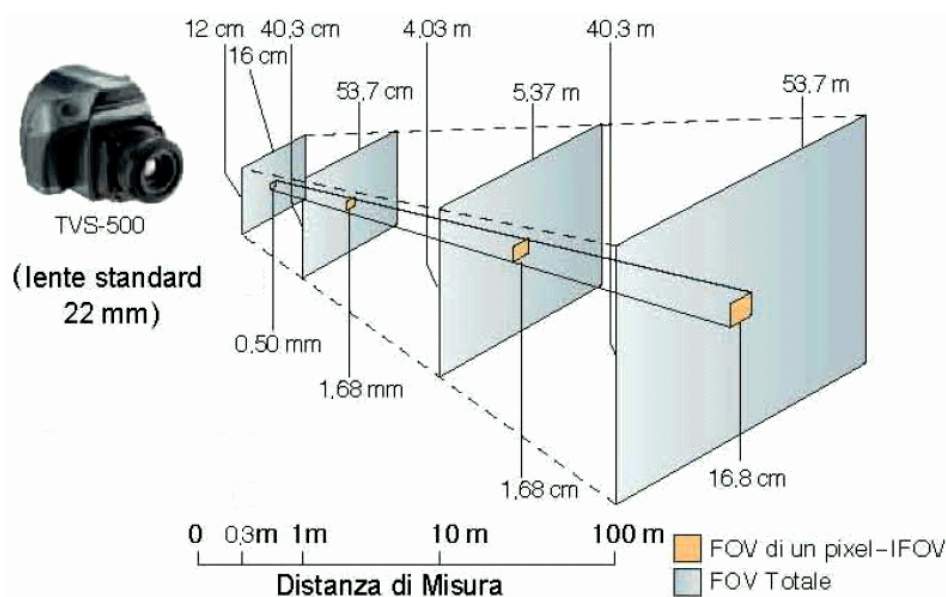


Figura 8.3.2.C. FOV e IFOV [Inprotec-Avio TVS-500].

I sensori a scansione presentano alcuni limiti importanti. Gli apparati di movimentazione dello specchio rotante sono caratterizzati da un notevole livello di complessità, dovendo eseguire anche svariate migliaia di movimenti al secondo (ad esempio, per una telecamera in grado di produrre ad ogni secondo 30 immagini termiche da 120 linee l'una, si devono eseguire 30 rotazioni al secondo su un arco verticale e ben 3600 su uno orizzontale). Alla complessità si associa anche una grande delicatezza, essendo sufficienti piccoli urti a provocare disallineamenti delle parti in movimento. Inoltre, dovendo ogni pixel di un'immagine termica essere acquisito dal medesimo rilevatore, l'inerzia di risposta del rilevatore stesso pone un limite superiore alla frequenza di acquisizione. Ne consegue l'impossibilità di produrre sequenze termografiche ad elevata frequenza e/o risoluzione geometrica: ad esempio, le telecamere a scansione per il mercato civile raramente erano in grado di acquisire più di 30 immagini al secondo da circa 160 x 120 pixel l'una, a cui corrisponde un numero di ben $30 \times 160 \times 120 = 576000$ acquisizioni al secondo, ovvero un tempo di acquisizione del singolo pixel inferiore a $2 \mu s$. Un valore così ridotto, combinato con le vibrazioni dello specchio rotante, comporta pure un basso rapporto segnale/rumore e quindi di una scarsa sensibilità termica (la minima differenza di temperatura misurabile), che nei sistemi a scansione è raramente inferiore a 0.1 K. Ancora, durante il monitoraggio di transitori termici veloci, di oggetti in rapido movimento o di campi termici caratterizzati da forti

gradienti di temperatura (ad esempio, corrispondenti a bordi di oggetti posti su un fondo a temperatura diversa oppure a minuscoli elementi di circuiti elettrici o elettronici soggetti a surriscaldamento), è facile avere sfocature dell'immagine termica, legate al fatto che il rilevatore non riesce a rispondere con sufficiente rapidità alla brusca variazione della radiazione elettromagnetica ricevuta durante la scansione.

Per ovviare ad alcuni dei problemi sopra citati ed ottenere sequenze termografiche sufficientemente nitide, gli strumenti termografici integranti sensori a scansione presentano spesso un modalità di acquisizione delle immagini termiche "interlacciata" (in inglese "interlaced": le immagini vengono aggiornate a linee alterne, in modo che ogni immagine presenta una linea ogni due uguale all'immagine precedente e a quella successiva) e, inoltre, consentono di effettuare una riduzione del rumore tramite processi di media mobile, in cui ogni immagine visualizzata è in realtà la media di un certo numero delle immagini termiche ultime acquisite (ad esempio 2, 4, 8 o 16). Tutto ciò, se da un lato va a migliorare la qualità visiva, dall'altro limita ulteriormente la possibilità di monitorare transitori termici veloci o oggetti in movimento.

La complessità, la delicatezza ed i vari limiti legati alla frequenza di acquisizione hanno causato nel tempo l'abbandono dei sensori a scansione e la loro sostituzione con sensori a matrice di rilevatori, comunemente denominati "focal plane array" (FPA). Questi sono costituiti da una matrice ("array") bidimensionale di rilevatori (Fig. 8.3.2.D), posti nel piano focale dell'ottica dello strumento termografico. Sono oggi (2007) commercialmente reperibili sensori con fino a 2048x2048 rilevatori, ma la maggior parte dei sistemi termografici integra sensori con numero di rilevatori dell'ordine di 160x120, 320x240 o 640x480.

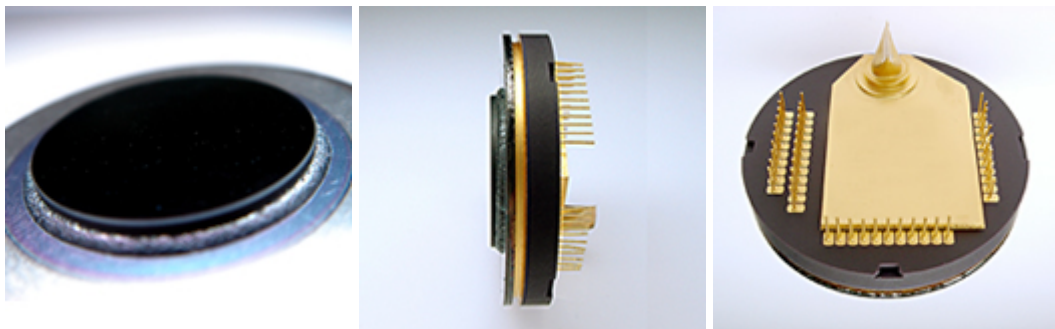


Figura 8.3.2.D. Sensore FPA non raffreddato Nec HX0830 [Nec].

Sono commercialmente disponibili anche sensori FPA monodimensionali, cioè a singola linea di rilevatori, utilizzati in processi di misura specialistici. Il loro impiego è stato considerato anche in apparati termografici a scansione, in modo da eliminare uno dei due movimenti dello specchio rotante, ma con poco successo in quanto l'approccio non fornisce una completa ed efficace soluzione dei problemi precedentemente illustrati.

I sensori FPA non presentano parti in movimento (ad eccezione degli eventuali dispositivi di raffreddamento criogenico) e sono perciò meccanicamente più semplici e robusti dei sensori a scansione. La frequenza di acquisizione richiesta al singolo rilevatore di una matrice bidimensionale, che ha campo di vista fisso (ma lo si continua a chiamare IFOV per analogia), è uguale a quella di acquisizione delle immagini termiche. È così possibile ottenere, da una parte, frequenze di acquisizione elevatissime, pari anche a diverse migliaia di immagini al secondo, dall'altra, tempi di integrazione (cioè di acquisizione della radiazione elettromagnetica da misurare per la costruzione di una singola immagine termica) relativamente lunghi, a vantaggio del rapporto segnale-rumore e, di conseguenza, della sensibilità termica (oggi anche migliore di 10 mK per sensori fotonici raffreddati).

I limiti dei sensori FPA vengono dall'elevatissimo numero di rilevatori integrato: una ormai consueta risoluzione geometrica delle immagini termiche di 320x240 pixel richiede una matrice di $320 \times 240 = 76800$ rilevatori. Questi sono in generale realizzati in materiale semiconduttore opportunamente formulato (con alcuni componenti presenti in parti per milione), ma la sua composizione può presentare fluttuazioni che, seppur minime, hanno un impatto sensibile sulla risposta alla radiazione termica misurata. Ne consegue una certa varietà di risposta tra i diversi rilevatori di un sensore a matrice. Ciò può essere compensato attraverso un processo di calibrazione di ogni singolo rilevatore, generalmente eseguito in modo automatico e basato sul puntamento dello strumento di misura su un corpo nero di riferimento o su un altro oggetto a temperatura superficiale ed emissività note ed uniformi (vedi § 8.3.6). Le tabelle dei parametri di calibrazione sono poi implementate in software nell'elettronica di controllo dello strumento termografico in esame. Tuttavia, alcuni rilevatori possono presentare un comportamento così diverso da quello desiderato da non poter essere corretto efficacemente mediante calibrazione. Inoltre, possono essere presenti rilevatori difettosi, con funzionamento discontinuo o addirittura non funzionanti. In effetti, questa situazione si presenta pressoché sempre e, solitamente, per una quota non trascurabile dei rilevatori di un sensore FPA, dell'ordine anche di uno o più punti percentuali del totale (ovvero di diverse centinaia o migliaia di rilevatori).

In sede di controllo della qualità, i sensori di prima scelta di una data linea produttiva, quelli con la frazione minore di rilevatori difettosi, sono abitualmente utilizzati per strumentazione ad elevato grado di sofisticazione e valore (apparecchiature militari o per ricerca scientifica di altissimo livello). I rilevatori difettosi comunque presenti vengono disattivati ed i corrispondenti pixel delle immagini termiche ricostruiti per interpolazione delle misure dei rilevatori immediatamente adiacenti. Sensori con quote maggiori di rilevatori difettosi vengono invece impiegati in strumenti a più ridotto valore, destinati alla ricerca scientifica e industriale, o al limite scartati. In realtà, per contenere il livello di scarti (altrimenti anche superiore al 50%), è pratica comune utilizzare i sensori a più bassa qualità realizzativa in strumenti cosiddetti non radiometrici, che (a differenza dei più costosi strumenti radiometrici) non restituiscono misure quantitative della distribuzione di temperatura superficiale, ma soltanto immagini termiche qualitative. In tali immagini, i diversi colori, o livelli di colore, dei singoli pixel non sono rappresentativi di una temperatura misurata nei diversi punti della superficie oggetto di monitoraggio, ma solo del segnale elettrico restituito dai rilevatori alla radiazione elettromagnetica proveniente dai diversi punti della superficie.

Per minimizzare ulteriormente il livello di scarti, è anche pratica comune ricavare da sensori con frazione elevata di rilevatori difettosi sensori a più bassa risoluzione geometrica. Ad esempio, in un sensore FPA con 320x240 rilevatori è possibile selezionare il migliore rilevatore di ogni gruppo di quattro e disattivare gli altri tre, ottenendo così un sensore con 160x120 rilevatori. Ciò ha però un impatto negativo sul "filling factor" (letteralmente, "fattore di riempimento"), che rappresenta il rapporto tra la porzione di superficie del sensore FPA effettivamente ricoperta da rilevatori attivi e la superficie totale su cui viene focalizzata la radiazione elettromagnetica raccolta nel campo di vista (FOV). In generale, è desiderabile un filling factor prossimo al 100%, pena la perdita di nitidezza dell'immagine causata dall'impossibilità di rilevare e misurare la radiazione elettromagnetica che ricade su zone inattive del sensore.

6.2.3. Pirometria

La pirometria è la misura senza contatto della temperatura di un oggetto ottenuta attraverso la misura dell'emissione termica propria dell'oggetto stesso e la conoscenza della sua emissività. Un apparato che esegue una misura di temperatura di tal genere è detto pirometro.

I primi pirometri sono stati realizzati per monitorare la temperatura di bagni di fusione o di oggetti incandescenti, al fine di stimarne la temperatura ed individuare il momento più opportuno per, ad esempio, eseguire una colata di fusione, oppure un trattamento meccanico o termico. Questa operazione è stata effettuata sin dall'antichità da fabbri e vetrai, che sulla base del colore del materiale incandescente, cioè della colorazione della radiazione visibile emessa dal materiale, decidevano il momento giusto per battere il ferro, colare il metallo o soffiare il vetro. In epoca più moderna, si è progressivamente svincolata la stima della temperatura dalla sensibilità dell'operatore. Dapprima si sono realizzati dispositivi binoculari in cui la colorazione della materia da lavorare, osservata attraverso una delle due ottiche, veniva confrontata con la colorazione di un riferimento ad incandescenza (ad esempio, una lampada con filamento attraversato da una corrente elettrica prefissata o regolabile), osservato attraverso l'altra ottica. Successivamente, con la disponibilità dei primi rilevatori di radiazione elettromagnetica termica, si è potuto circoscrivere l'intervento dell'operatore nel processo di stima della temperatura all'impostazione del valore di emissività termica, realizzando così i primi strumenti a funzionamento semi-automatico o automatico.

...
Figura 8.3.3.A. Pirometro IR [...].

Alcuni moderni pirometri sono in grado di determinare contemporaneamente sia l'emissione termica che l'emissività della superficie misurata, ad esempio attraverso la combinazione di misure dell'emissione termica in due o più bande spettrali (dispositivi dual-band o multiple-band, vedi § 8.3.5). Tuttavia, i dispositivi di più larga diffusione richiedono di digitare il valore dell'emissività, stimabile tramite uno dei metodi illustrati nel § 8.3.5, oppure presentano valore dell'emissività preimpostato e non modificabile, ad esempio pari 0.95-0.96 per misure della temperatura corporea di uomini e animali o della temperatura superficiale oggetti non metallici scabri.

I dispositivi pirometrici possono essere completati con ottiche (lenti) atte a modulare opportunamente il campo di vista del sensore, che generalmente si desidera restringere per osservare una porzione ben circoscritta della superficie da misurare.

È anche possibile corredare un pirometro di accessori a fibra ottica trasparente alla radiazione elettromagnetica misurata, col fine di trasmetterla al rilevatore attraverso percorsi otticamente non accessibili. Ciò è possibile in virtù delle proprietà di trasmissione tipiche di una fibra ottica, in cui la radiazione elettromagnetica che entra perpendicolarmente ad una delle due superfici terminali può propagarsi all'interno della fibra anche se questa presenta sviluppo longitudinale curvilineo, in virtù del fatto che le superfici laterali della fibra stessa sono investite dalla radiazione trasmessa in direzione pressoché tangenziale e, in conseguenza di ciò, la riflettono specularmente (Fig. 8.3.3.B). Dispositivi a fibra ottica sono solitamente impiegati per effettuare misure di temperatura in vani chiusi e otticamente inaccessibili, in camere di combustione, attraverso fiamme, all'interno di ambienti e apparati soggetti a forti campi elettromagnetici o saturati da gas nocivi.

...
Figura 8.3.3.B. Schema di funzionamento di una fibra ottica [...].

6.2.4. Termografia e sistemi (video)termografici

Apparati di misura senza contatto atti ad effettuare misure non semplicemente puntuali, ma della distribuzione di temperatura (o di emissione elettromagnetica termica) su tutte le superfici comprese in un certo angolo solido, furono inizialmente sviluppati in ambito militare per individuare, in virtù di una loro temperatura differente dallo scenario di fondo, oggetti altrimenti non visibili. Il primo di una categoria di dispositivi denominati FLIR, acronimo di “forward looking infra-red”, fu realizzato da Texas Instruments nel 1964 per scoprire, da aerei o elicotteri, obiettivi militari quali veicoli o persone celati da cortine mimetiche, oppure resi otticamente invisibili dal buio, dalla nebbia o dal fumo.

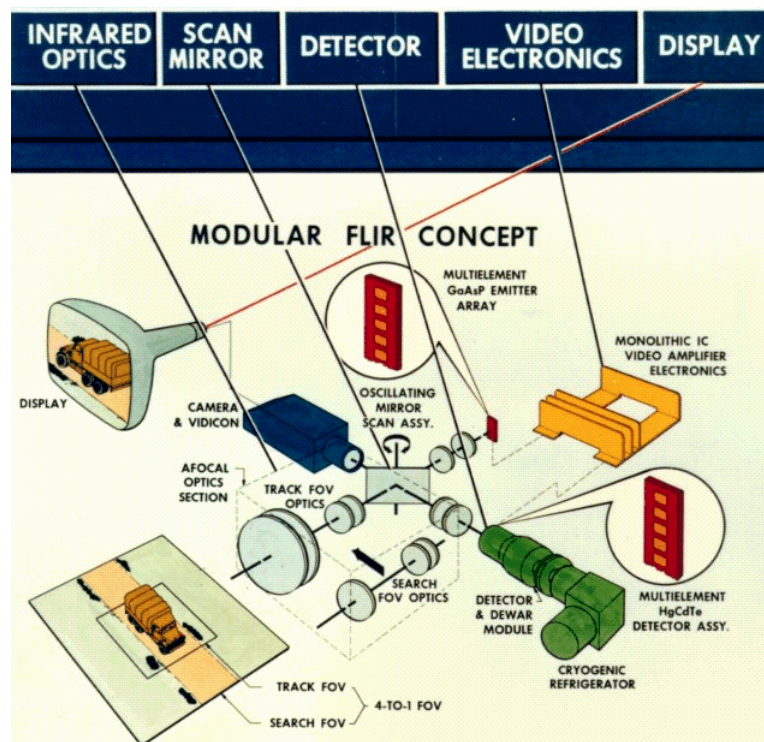


Figura 8.3.4.A. Schema funzionale dei primi dispositivi FLIR di Texas Instruments [Kopp].

Con FLIR (o Flir) si identificò inizialmente una telecamera ad immagine termica “forward looking”, cioè rivolta verso l’avanti di un velivolo, con sensore che scansionava l’angolo solido osservato e produceva un segnale poi convertito in una sequenza di immagini di tipo televisivo, in bianco e nero, nelle quali il livello di luminosità di ogni pixel era proporzionale alla radiazione termica misurata (Fig. 8.3.4.A). In effetti, la telecamera cominciò ben presto ad essere alloggiata in una torretta rotante che ne consentiva il puntamento in tutte o quasi le direzioni, oppure vennero sviluppati dispositivi aeroportati il cui sensore scansionava continuamente il terreno sottostante lungo una linea perpendicolare alla direzione di avanzamento, rendendo così superato il concetto di “forward looking”. Ciononostante, il termine FLIR ha continuato ad essere utilizzato per indicare un generico sistema di scoperta all’infrarosso, indipendentemente dalla sua direzione di puntamento. A detto termine si è recentemente affiancato, con significato sostanzialmente analogo, il termine IIS, acronimo di “infrared imaging system”, col quale si tende ad identificare un generico sistema di visione ad immagine termica operante nell’infrarosso, a prescindere dalle finalità d’uso.

Prima ancora che nei FLIR, l’impiego di sensori termici a scansione per individuare obiettivi all’interno di un dato campo visivo si è avuto, sempre in ambito militare, nei missili terra-aria

o aria-aria a ricerca termica nell'infrarosso ("infrared homing missile"). In questo tipo di armamenti, un angolo solido davanti al missile viene scansionato alla ricerca di punti molto più caldi del cielo o del suolo sullo sfondo, potenzialmente corrispondenti agli ugelli dei motori o ad altre parti calde di un velivolo ostile e sui quali viene guidato il missile. Un missile terra-aria a ricerca termica, l'Enzian, venne sperimentato già durante la seconda guerra mondiale in Germania [Enzian-Wikipedia], ma non raggiunse una sufficiente affidabilità. Successivamente, subito dopo la guerra, vennero avviati negli U.S.A. studi sui missili a ricerca termica, il cui primo importante prodotto fu l'AIM-9 Sidewinder (Fig. 8.3.4.B), missile aria-aria sperimentato per la prima volta nel 1953, introdotto in servizio a partire dal 1956 e tuttora in uso in versioni aggiornate e varianti [AIM-9]. Il Sidewinder (il nome deriva da quello di un serpente in grado di vedere le sue prede nell'infrarosso) integra un sensore IR ed uno specchio che continuamente ruota intorno ad un alberino allineato all'asse del missile, proiettando così sul sensore la radiazione termica rilevata nelle varie direzioni radiali rispetto all'asse di rotazione; un possibile bersaglio caldo viene rilevato come un picco di radiazione termica in una certa direzione radiale, tanto più breve quanto più la posizione del bersaglio è laterale rispetto all'asse del missile. I missili a ricerca termica, anche di tipo aria-superficie o superficie-superficie, costituiscono oggi una dotazione standard di tutte le forze armate.



Figura 8.3.4.B. AIM-9A Sidewinder, missile aria-aria a ricerca infrarossa [AIM-9].

Dai vari dispositivi di scoperta all'infrarosso sviluppati per il settore militare vennero presto derivate varianti specificamente indirizzate al mercato civile, in particolare al controllo dei processi industriali, all'elettronica, al settore biomedicale e a quello delle ispezioni termiche non distruttive. I dispositivi militari e commerciali hanno poi conosciuto un progresso delle prestazioni relativamente rapido, che è stato accompagnato da una diminuzione dei prezzi di vendita divenuta particolarmente sensibile negli ultimi anni (2005-2007). Le loro caratteristiche, prestazioni e caratteristiche distintive sono discusse approfonditamente nel seguito.

Lo standard di mercato degli strumenti videotermografici è oggi (2007) costituito da sistemi con sensore FPA, sia raffreddati che non raffreddati (vedi § 8.3.2), che hanno completamente soppiantato i sistemi termografici a scansione. Questi ultimi hanno infatti qualche limitato vantaggio sui sensori a matrice (principalmente, il fatto che l'elemento sensibile è unico) e molti svantaggi (frequenza di campionamento limitata dall'inerzia del sensore, sensibilità penalizzata dal ridottissimo tempo di acquisizione, ecc.). Un ambito residuale in cui i sensori a scansione continuano ad essere impiegati è quello del monitoraggio delle linee di produzione, in cui si utilizzano apparati di tipo line-scanner perché il sensore scansiona continuamente un processo in avanzamento lineare, ad esempio su nastro trasportatore, rilevando la temperatura lungo una linea fissa perpendicolare alla direzione di avanzamento, e producendo così, per effetto dell'avanzamento del processo, una serie indefinita di linee di misura. Dispositivi di tal genere consentono acquisizioni di 10-50 linee al secondo su archi fino a $90\div 100^\circ$ con risoluzione geometrica fino a $1\div 4$ mrad ($0.017^\circ\div 0.070^\circ$, a cui corrispondono fino a diverse centinaia di punti per linea).



Figura 8.3.4.C. Apparato industriale line-scanner Centurion TK [Inprotec- Centurion TK].

8.3.4.1. Termocamere commerciali

Le termocamere o (video)termografi, strumenti in grado di acquisire sequenze di immagini termiche degli oggetti osservati, sono costituite da alcuni elementi fondamentali:

- Il sensore, generalmente di tipo FPA ed eventualmente integrante un apparato di raffreddamento criogenico o di stabilizzazione termica
- L'ottica che focalizza la radiazione elettromagnetica sul sensore
- L'elettronica di amplificazione e conversione del segnale elettrico prodotto dal sensore

A quelli sopra elencati vanno aggiunti elementi secondari e accessori quali l'involucro della telecamera e i componenti per alimentazione elettrica (batterie, trasformatori), visualizzazione grafica (display TFT), memorizzazione locale (memorie flash) ed esportazione dei dati (interfacce IEEE-1394, USB, video composito e/o proprietarie).

Il sensore è l'elemento fondamentale, che condiziona le prestazioni e le potenzialità di utilizzo della termocamera e ne costituisce la principale voce di costo. Esso può anche limitare la possibilità di approvvigionamento di uno strumento, in quanto il Dept. of Defence (DoD) degli U.S.A. si riserva di concedere o negare la vendita e l'esportazione di sensori nell'infrarosso atti ad un utilizzo militare. Di non secondaria importanza, quantomeno in termini di costo, è anche l'ottica, mentre l'elettronica sta conoscendo incrementi delle prestazioni e cadute dei costi con progressione esponenziale. La maggior parte delle termocamere in commercio sono anche corredate di software per l'analisi su computer delle immagini termiche acquisite e, eventualmente (in combinazione con adeguate interfacce dati), per l'acquisizione in tempo reale di sequenze di immagini.

Le immagini termiche sono generalmente visualizzabili sia su un display integrato che sullo schermo di eventuali calcolatori esterni, utilizzando a tal scopo scale monocromatiche (a toni di grigio, verde, ambra o rosso, ecc.) in cui l'intensità di colore è proporzionale al livello della radiazione elettromagnetica o della temperatura misurate. In alternativa, sono utilizzate anche scale di cosiddetti falsi colori, in cui si associa un particolare spettro cromatico all'intervallo dei diversi livelli di emissione elettromagnetica o di temperatura. La scala a falsi colori più utilizzata è ricalcata sull'iride, con colori che vanno dal blu scuro (temperature più basse) al

rosso brillante o al bianco (temperature più alte), passando per le diverse tonalità del blu, del verde, del giallo, dell'arancione e del rosso (vedi Fig. 8.3.4.D).

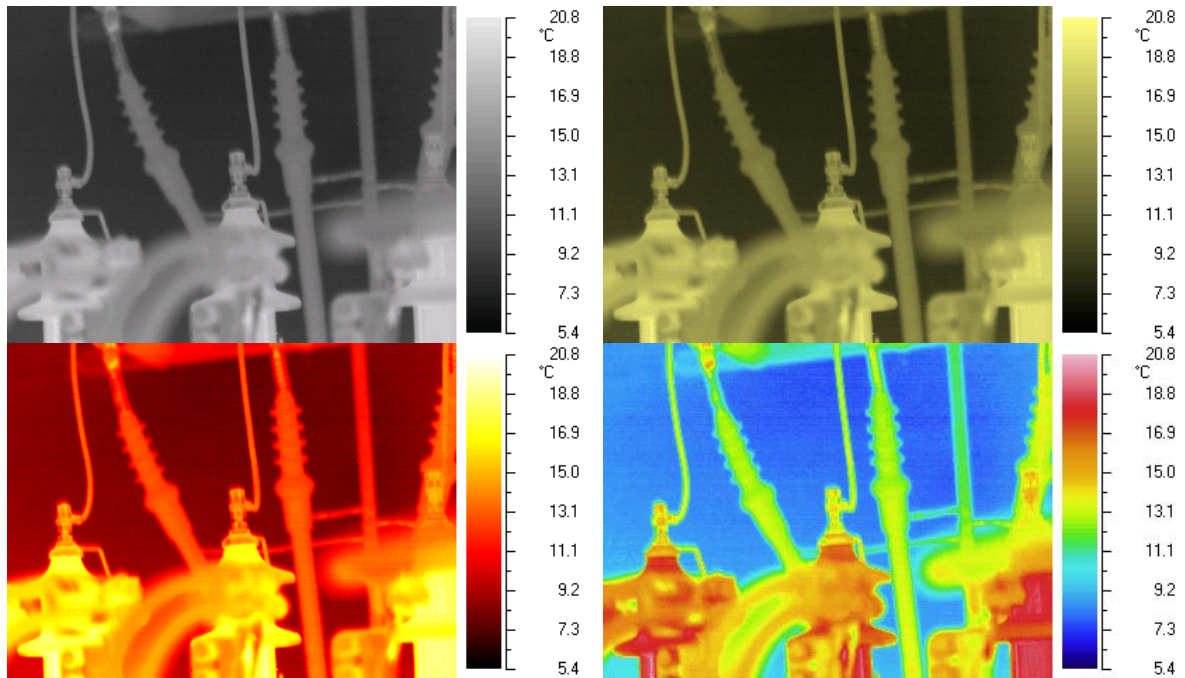


Figura 8.3.4.D. Immagine termica visualizzata con diverse mappe cromatiche: toni di grigio, di ambra e di rosso, falsi colori (iride).

Al fine di identificare ed illustrare le principali caratteristiche di un sistema termografico odierno, si passano in rassegna nel seguito le specifiche tecniche di due termocamere di produzione corrente, una raffreddata e l'altra non raffreddata, rispettivamente riportate in Tab. 8.3.4.A e Tab. 8.3.4.B.

Tabella 8.3.4.A.
Cedip Silver 660M – Specifiche di sistema (in inglese) [Inprotec-Cedip].

<i>Feature list</i>	
Sensor type	InSb
Waveband	3.7 – 5.1 μm
Pixel resolution	640 x 512
Pitch	15 μm
NETD	< 20 mK – Typical 15 mK
Cooler	Integral stirling cooler
Frame rate	Up to 120 Hz full frame
Sub array windowing	Random size arbitrary location (min 16x4)
Integration time	Variable from 10 μs to 5000 μs
Frame rate in sub-window mode	20000 Hz with 16x4 pixel sub-window
Lens	Built in motorised optical lens – 25 mm
Optical interface	bayonet
Field of view	20° x 15°
Filter wheeler	Removable filter carrier wheel – 4 slots available
Analogue video	S-Video
Digital video	USB2 and CAMLINK – 14 bit digital data
Trigger input	Smart trigger capability – Pre and post trigger features – TTL input
Trigger jitter	< 300 ns (ITR Mode)
Temperature calibration range	-20°C to +150°C / +100°C to +1500°C
Temperature measurement accuracy	$\pm 1^\circ\text{C}$ for temperature <100°C, $\pm 1\%$ above
<i>Physical specifications</i>	
Size (L x W x H)	300 mm x 135 mm x 165 mm
Weight	1.7 kg
Base mounting	Standard 1/4"
Operational temperature	-15°C to +50°C
Shock	25 g IEG 60068-2-29
Vibration	2 g IEG 60068-2-26
Input voltage	+12 VDC
Power consumption	30 W
<i>Optical lenses / Bayonet mount</i>	
Microscope lens	G1:X1 – 12.5 μm resolution
Close up lens	50 μm resolution
	12 mm FOV 38°
	50 mm FOV 11°
	200 mm FOV 2.5°

Tabella 8.3.4.B.
Avio TVS-500 – Specifiche di sistema (in italiano) [Inprotec-Avio].

Campo di misura temperatura	Standard: -40°C ~ 500°C, estendibile a ~ 2000°C con filtro opzionale alta temp.		
Risoluzione termica	Migliore di 0.06°C con media immagini		
Precisione	±2°C o ±2%		
Frequenza immagini	1/60 s		
Sensore	Microbolometrico VO _x non raffreddato FPA, 320 (H) x 240 (V)		
Campo spettrale	6 ~ 14 μm		
FOV	30.6° (H) x 23.1° (V) con lente standard		
Risoluzione spaziale	1.68 mrad		
Distanza di messa a fuoco	Da 30 cm a infinito		
Pixel effettivi	320 (H) x 240 (V)		
A/D	14 bit		
Display	Monitor a colori LCD da 3.5" TFT – Possibilità d'invertire il display con correzione visione		
Telecamera visibile	Integrata		
Funzione	Misura temperatura	Fino a 5 punti	
	Compensazione emissività	Fino a 5 punti (anche con immagini registrate)	
	Mixing immagine	Mixing immagine visibile ed IR con regolazione livello	
	Tracking temperatura minima / massima	Si	
	Autorange temperatura	Auto Sense / Auto Punto / PPM / R&D / Medicale	
	Zoom digitale	X2, X4, Scroll, Scroll Area	
	Congelamento immagine	On / Off	
	Isoterma	Superiore / Inferiore / Centrale	
	Visualizzazione griglia	Si	
	Allarme	Segnale d'uscita	Allarme per sovra e sotto temperatura (Singolo / Continuo)
		Registrazione	Si
			Trigger Allarme
	Tavolozza colori	Rainbow / Rainbow Contrast / Hotiron / Ironow / Hotwhite / Hotblack	
	Miglioramento immagine	Media image (2, 4, 8, 16)	
Altre funzioni	Compensazione emissività, Data ed Ora, Batteria, Ultima Configurazione		
Scheda CF	Registrazione Dati	300 immagini / 64 MB, fino a 512 MB	
	Modo	Formatta CF / Cancella / Creazione directory / Nome file / Registrazione singola o temporizzata / Visualizzazione singola o Gallery / Nome file	
	Formato File	IRI, BMP, LOG (immagini IR), JPEG (Immagini visibile), BMP (Mixing) Registrazione simultanea di immagine visiva, termica e mixing	
	Intervallo di registrazione	Da 3 s a 23:59:59 h	
Unità temperatura	°C / °F / K		
Uscita video	NTSC o PAL		
PC interface	RS-232C, USB, IEEE 1394 (opzionale,)		
Alimentazione	Batteria Li-ion, Alimentatore, batteria a lunga durata		
Potenza assorbita	14 W		
Autonomia Batteria	<2 h, minore di 4 h con batteria a lunga durata (opzionale)		
Temperatura di funzionamento / Umidità	Da -10°C a 50°C, 80% senza condensa		
Dimensioni	115 (Larg.) x 220 (Lungh.) x 90 (H) mm		
Peso	1.7 kg (con lente)		
Grado di protezione	IP54		
Shock	30 g IEG 60068-2-27		
Vibrazioni	3 g IEG 60068-2-6		

I principali parametri riportati in Tabb. 8.3.4.A-B sono i seguenti:

- NETD, acronimo di “noise equivalent temperature difference”, è un indicatore della sensibilità del sensore: differenze di temperatura minori del NETD non sono percepibili in un’immagine termica in quanto sono inferiori al rumore di fondo. Attualmente, il NETD può variare da circa 10-20 mK per termocamere con sensore raffreddato fino a circa 60-200 mK per termocamere con sensore non raffreddato (con i valori migliori generalmente ottenuti attraverso un processo di media mobile di immagini in sequenza). In italiano si parla di sensibilità termica o, un po’ impropriamente, di risoluzione termica.
- Waveband (in italiano Campo spettrale, o anche Finestra operativa) rappresenta la banda dello spettro della radiazione elettromagnetica sfruttata dal sensore; termocamere per misure a temperatura ambiente o di poco superiore sfruttano le bande spettrali 3÷5 μm e 7÷14 μm (la seconda delle quali è la meno influenzata dall’umidità atmosferica e quindi la più usata per misure in campo aperto), oppure loro porzioni.
- Pixel resolution (in italiano Pixel effettivi, o anche Risoluzione geometrica), rappresenta il numero di pixel in un’immagine termica, in linea di principio identico al numero di rilevatori di un sensore FPA: attualmente, hanno la massima diffusione termocamere con sensori da 320x240 o 160x120 rilevatori (circa), sia raffreddati che non raffreddati, ma sono commercialmente disponibili termocamere da 640x480 pixel e oltre ed esistono sistemi militari o applicazioni scientifiche di altissimo livello arrivano a risoluzioni dell’ordine di 2048x2048 pixel.
- Frame rate (in italiano Frequenza immagini, o Frequenza di acquisizione) è il massimo numero di immagini termiche acquisibili in sequenza nell’unità di tempo. In un sensore FPA è tipicamente limitato a valori tra 25÷30 e 100÷120 Hz a causa dell’inerzia dei rilevatori (per i sensori non raffreddati) e/o dalla velocità del multiplexer e del bus dati che connettono il sensore all’elettronica. Quest’ultimo limite può essere aggirato nei sensori FPA raffreddati operando in Sub-window mode (o Sub array windowing o Sub-windowing), sfruttando cioè un numero limitato dei rilevatori del sensore, formanti una sotto-finestra di pochi pixel di lato.
- A/D (o profondità dell’immagine) rappresenta il numero di livelli discreti che può assumere il segnale digitale nel quale viene convertito il segnale analogico prodotto dal sensore. I primi sistemi termografici erano generalmente a 4 bit e producevano immagini termiche con $2^4 = 16$ distinti colori/livelli di temperatura; la profondità dell’immagine è successivamente aumentata, arrivando a prima 8 bit ($2^8 = 256$ colori/livelli di temperatura) e poi a 12 bit ($2^{12} = 4096$), fino a raggiungere, già nei primi anni di questo secolo, i 14 bit ($2^{14} = 16384$) e persino i 16 bit ($2^{16} = 65536$); in effetti, se si combina il miglior valore oggi possibile di NETD (circa 0.010 K) con l’ampiezza del campo termico misurabile dalle telecamere odierne (<200 K senza filtri alta temperatura), si può facilmente verificare come profondità di immagine superiori a 14÷16 bit non siano particolarmente utili (ad esempio, $200 \text{ K} / 0.010 \text{ K} = 20000$ colori/livelli di temperatura).

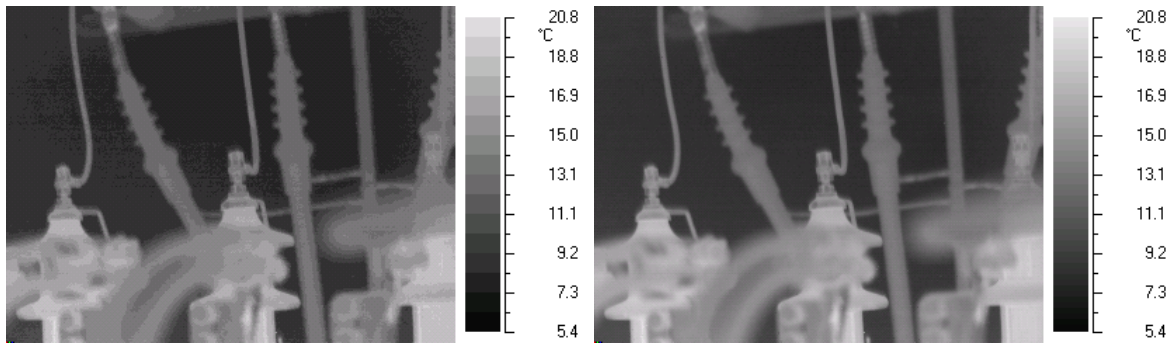


Figura 8.3.4.E. Immagine termica visualizzata a 4 e 8 bit (16 e 256 colori).

- Temperature range, o Temperature calibration range (in italiano Campo di misura temperatura), rappresenta l'intervallo delle temperature che lo strumento può rilevare. Il limite inferiore (tipicamente $-20^{\circ}\text{C}/-40^{\circ}\text{C}$), è dato dal minimo livello di energia elettromagnetica percepibile dai rilevatori, mentre il limite superiore è quello oltre il quale il sensore “satura” ed il segnale elettrico prodotto raggiunge il fondo scala. Il campo di misura temperatura può essere esteso e/o traslato verso l'alto adottando filtri che riducono la radiazione elettromagnetica focalizzata sul sensore, innalzando così la temperatura di saturazione, ma in genere a scapito della sensibilità e della precisione.
- FOV, acronimo di “field of view”, in italiano Campo di vista, è l'angolo solido complessivamente monitorato dal sensore dello strumento termografico (vedi § 8.3.2.3). Può essere spesso modulato sostituendo la Lente (in inglese Lens) dello strumento.
- IFOV (o pixel FOV), acronimo di “instantaneous field of view”, in italiano Campo di vista istantaneo o Risoluzione spaziale, è l'angolo solido monitorato dal singolo rilevatore di un sensore FPA (vedi § 8.3.2.3).
- Temperature measurement accuracy (o semplicemente Accuracy), in italiano tradotto con Accuratezza o, più impropriamente, con Precisione, è l'accuratezza della misura di temperatura restituita dalla termocamera per un oggetto di cui è nota l'emissività.
- Analogue video (output), in italiano Uscita video, indica il tipo di segnale video analogico eventualmente prodotto dallo strumento, ovviamente solo qualitativo e generalmente di tipo PAL (standard europeo, a 50 Hz) o NTSC (standard USA/Giappone, a 60 Hz).
- Digital Video (output) o PC interface è l'interfaccia di esportazione delle immagini termiche in formato digitale, quasi sempre presente su strumenti radiometrici e basata sugli standard USB e IEEE-1394 (firewire), oppure su interfacce proprietarie.

6.2.5. Stima dell'emissività superficiale e dispositivi dual-band/multiple band

Valori di emissività superficiale dei vari materiali sono tipicamente riportati in appendice ai manuali che accompagnano gli strumenti o ai manuali didattici e tecnici sullo scambio termico. Tuttavia, nell'utilizzo dei valori sopra menzionati va sempre impiegata molta cautela, specialmente quando essi riguardano materiali metallici, poiché sono riferiti a condizioni di finitura superficiale ben precise e quasi sempre differenti da quelle del caso pratico in esame. Tra l'altro, la descrizione dello stato superficiale a cui un valore tabulato si riferisce è spesso vaga e non univocamente interpretabile (“lucido”, in termini di valore effettivo della scabrezza e dell'eventuale stato di ossidazione superficiale, non significa

molto). A titolo esemplificativo, si riportano in tab. 8.3.5.A alcuni valori di emissività reperibili in letteratura per l'acciaio inossidabile.

Tabella 8.3.5.A. Emissività superficiale dell'acciaio inossidabile a 800 K [Incropera-DeWitt].

<i>Stato superficiale</i>	ε
Lucidato a specchio	0.23
Pulito, ludo	0.28
Leggermente ossidato	0.33
Altamente ossidato	0.67

L'estrema variabilità dei dati lascia immaginare la loro relativa inaffidabilità, specialmente se utilizzati da un operatore con scarsa esperienza. In definitiva, nella maggior parte dei casi in cui esiste una forte incertezza sullo stato superficiale e si desidera una misura della temperatura accurata, è opportuno determinare sperimentalmente l'emissività della superficie in esame. Gli approcci attuabili sono vari:

- Si applica ad una piccola porzione della superficie uno strato di ricoprimento ad emissività nota, ad esempio una vernice o un film adesivo sottile (solitamente con $\varepsilon > 0.95 \div 0.97$); nell'ipotesi che la temperatura della superficie ricoperta sia uguale alla temperatura della superficie scoperta immediatamente adiacente (generalmente accettabile in presenza di materiali buoni conduttori del calore), è possibile variare la regolazione dell'emissività nello strumento di misura utilizzato fintantoché la temperatura rilevata sulla superficie scoperta non eguagli quella sulla superficie ricoperta, determinata precedentemente in virtù della conoscenza della sua emissività superficiale; il valore di emissività così trovato è quello proprio della superficie misurata
- Si crea sulla superficie misurata una piccola cavità cieca, la cui apertura sull'ambiente esterno si comporterà da superficie nera se la profondità è maggiore di circa 6 volte il diametro; nell'ipotesi che la temperatura della cavità sia uguale alla temperatura della superficie scoperta immediatamente adiacente (generalmente accettabile in presenza di materiali buoni conduttori del calore), è possibile variare la regolazione dell'emissività nello strumento di misura utilizzato fintantoché la temperatura rilevata sulla superficie scoperta non eguagli quella sull'apertura della cavità, determinata precedentemente in virtù del suo comportamento da corpo nero ($\varepsilon \cong 1$); il valore di emissività così trovato è quello proprio della superficie misurata
- Si misura la temperatura della superficie in esame con un sensore termico a contatto diretto; si varia quindi la regolazione dell'emissività nello strumento di misura IR utilizzato fintantoché la temperatura rilevata sulla superficie non eguagli quella misurata precedentemente a contatto; il valore di emissività così trovato è quello proprio della superficie misurata

In alternativa, è possibile modificare e controllare il valore di emissività trattando opportunamente la superficie misurata, ad esempio ricoprendola con vernici ad emissività nota. In questi casi, si tende ad utilizzare vernici ad emissività elevata, per eliminare anche i disturbi dati dalle riflessioni delle emissioni elettromagnetiche termiche provenienti dall'ambiente di prova, soprattutto da corpi caldi (persone, lampade, macchinari, ecc.) ivi presenti.

Per svincolare la determinazione dell'emissività dall'intervento dell'operatore, si possono anche utilizzare dispositivi a due colori ("two-color thermometer" o "ratio thermometer"), che

sfruttano contemporaneamente due bande spettrali distinte. Infatti, se la superficie misurata è grigia, se cioè la sua emissività è indipendente dalla lunghezza d'onda (ipotesi generalmente accettabile, quantomeno nelle due bande di misura utilizzate se queste sono sufficientemente vicine), il rapporto tra i poteri emissivi misurati nelle due bande è uguale al rapporto tra i corrispondenti poteri emissivi di corpo nero. Ma è anche possibile dimostrare che esiste una relazione di proporzionalità tra il rapporto tra i poteri emissivi di corpo nero e la temperatura della superficie:

$$\frac{E_{\Delta\lambda,1}}{E_{\Delta\lambda,2}} \equiv \frac{\varepsilon E_{\Delta\lambda,1,n}}{\varepsilon E_{\Delta\lambda,2,n}} = \frac{E_{\Delta\lambda,1,n}}{E_{\Delta\lambda,2,n}} = f(T) \quad (8.3.5.1)$$

Alcuni dispositivi impiegano più di due bande spettrali (“multi-wavelength thermometers”) per compensare effetti della dipendenza dell'emissività dalla banda spettrale o dalla temperatura ed ottenere così misure molto precise.

Si noti che dispositivi a due o più colori vengono utilizzati non solo per risolvere la questione della stima dell'emissività, ma anche (e soprattutto) per studiare casi in cui l'emissione elettromagnetica termica presenti singolarità spettrali importanti (come, ad esempio, nell'irraggiamento di fiamma).

Non va mai dimenticato che l'emissività di una superficie dipende dalla temperatura, sebbene tale dipendenza sia moderata in presenza di escursioni termiche limitate. Inoltre, e soprattutto, l'emissività dipende dalla direzione di osservazione rispetto alla normale alla superficie: superfici non metalliche presentano emissività pressoché uniforme fino ad angoli rispetto alla normale pari a circa 70°, dopodiché l'emissività scende rapidamente a zero (Fig. 8.3.5.A); superfici metalliche presentano invece un comportamento più complesso, con emissività che si mantiene costante in un intorno della normale, poi aumenta ed infine va a zero (Fig. 8.3.5.A). Ne possono derivare, in caso di osservazione di oggetti tridimensionali con superfici curve o a inclinazione variabile, visualizzazioni di gradienti superficiali di temperatura che in realtà sono solo apparenti.

Figura 8.3.5.A. Dipendenza dell'emissività dall'angolo di osservazione rispetto alla normale.

Alcune termocamere e molti software di analisi delle immagini termiche consentono di definire mappe dell'emissività superficiale, ottenute acquisendo un'immagine termica quando tutte le superfici di interesse osservate si trovano ad una stessa temperatura. Con routine software automatiche è quindi possibile associare ad ogni rilevatore di un sensore FPA, ovvero ad ogni pixel di un'immagine termica, un diverso valore dell'emissività superficiale, che è quello per cui, durante l'osservazione di un campo di temperatura isoterma, la termocamera restituisce una distribuzione di temperatura uniforme. La mappa dei valori delle emissività così determinata può essere poi applicata ad immagini acquisite in presenza di un campo termico difforme per determinare la corretta distribuzione di temperatura.

La costruzione di mappe di emissività è utile sia per compensare la dipendenza dell'emissività dalla direzione di osservazione, sia per monitorare transitori termici di oggetti ad emissività non omogenea. Ovviamente, l'approccio è utilizzabile solo per problemi con campo di vista statico.

6.2.6. Calibrazione degli strumenti di misura senza contatto: corpi neri di riferimento

I sensori di misura senza contatto sono oggi prevalentemente basati sull'utilizzo di semiconduttori formulati e drogati opportunamente. Un problema che però si riscontra è che anche minime variazioni nella composizione del materiale semiconduttore possono comportare variazioni significative nella risposta del sensore, vale a dire nella relazione di proporzionalità tra radiazione elettromagnetica termica rilevata e segnale elettrico restituito. Il problema è particolarmente rilevante nei sensori FPA, di fatto costituiti da matrici di diverse decine di migliaia di dispositivi rilevatori, i quali possono presentare anche fortissime differenze di funzionamento l'uno rispetto all'altro e/o rispetto al comportamento atteso. Per questo motivo, le relazioni matematiche che legano il segnale elettrico prodotto alla temperatura misurata, implementate nell'elettronica di controllo dei dispositivi all'infrarosso, sono tipicamente ottenute per calibrazione sperimentale pixel per pixel, attuata tramite processi automatici in considerazione dell'elevatissimo numero di rilevatori presenti in un sensore FPA.

La calibrazione di un sensore termico senza contatto è ottenuta puntando il sensore stesso verso un riferimento ad emissività e temperatura superficiale note. In effetti, per superare il problema della conoscenza dell'emissività superficiale (che, tra l'altro, presenta sempre una seppur minima dipendenza dalla temperatura della superficie emittente), si utilizza solitamente un riferimento che approssima un comportamento di corpo nero (cioè $\varepsilon \cong 1$), cioè un cosiddetto corpo nero di riferimento (Fig. 8.3.6.A).



Figura 8.3.6.A. Calibrazione di un pirometro su un corpo nero di riferimento [Omega Transactions].

Un corpo nero di riferimento è generalmente costituito da una cavità isoterma, cioè le cui superfici sono mantenute a temperatura uniforme. La condizione di isoterma è solitamente ottenuta realizzando le pareti che delimitano la cavità in materiale altamente conduttivo ed isolandole termicamente dall'ambiente esterno. Il valore di temperatura superficiale, controllato da un apposito dispositivo riscaldatore/refrigeratore, è tipicamente impostabile in un intervallo relativamente ampio. Le superfici della cavità, che può essere realizzata in diverse geometrie (ad esempio conica o tronco-conica, cilindrica, emisferica, ecc) sono trattate in modo da presentare un'emissività elevata. Sulla cavità è infine aperto un foro, attraverso il quale la cavità stessa è osservabile dall'esterno. Su tale foro, che presenta di fatto

un comportamento di corpo nero, vengono puntati i sensori all'infrarosso al fine di eseguire le operazioni di calibrazione.

Anziché corpi neri di riferimento, si possono utilizzare per la calibrazione dei sensori senza contatto anche superfici termostate ad emissività nota (generalmente alta), oppure filamenti ad incandescenza (per misure ad altissima temperatura).