

SENSORI ELETTRO-OTTICI MINIATURIZZATI PER IL TELERILEVAMENTO AMBIENTALE

Marco BORTONE, Luca FIORANI, Stefania MATTEI, Cristiano RUOCCHIO,
Sergio VETRELLA

(*) CO.RI.S.T.A. - Consorzio di Ricerca su Sistemi di Telesensori Avanzati, Piazzale Tecchio 80, 80125 Napoli,
tel.: 081-5935101, fax: 081-5933576, e-mail: smattei@unina.it

Riassunto

L'articolo presenta alcuni sistemi elettro-ottici per il rilevamento remoto progettati e realizzati dal CO.RI.S.T.A. (Consorzio di Ricerca su Sistemi di Telesensori Avanzati) nell'ambito delle sue attività di ricerca. In particolare, vengono presentati uno spettrometro avanzato ad immagine compatto ad elevata risoluzione per l'osservazione di gas in atmosfera ed una sonda innovativa, composta da sensori miniaturizzati di umidità e temperatura, mini-telecamera e *range-finder* ottico, per condurre indagini remote poco invasive del sottosuolo in aree archeologiche.

Abstract

Advanced miniaturised electro-optical remote sensors developed by CO.RI.S.T.A. (Consortium for Research on Advanced Remote Sensing Systems) during its research activities are described. Particularly, a new compact high resolution imaging spectrometer devoted to atmospheric gases analysis and an innovative system, composed by a miniaturised humidity and temperature sensors, camera and optical range-finder, devoted to underground remote sensing for archaeological application.

Introduzione

L'importanza dell'uso delle tecniche di rilevamento a distanza per valutare la vulnerabilità ed il rischio cui il territorio è soggetto è ormai già da tempo dichiarata dalla comunità scientifica. Tali tecniche, infatti, rappresentano un'opportunità unica per l'acquisizione sistematica nel tempo e nello spazio di dati relativi ai più svariati fenomeni naturali. Negli ultimi anni, si è cercato di identificare appropriati mezzi di accesso alla ricerca scientifica nel campo del telerilevamento in grado di presentare flessibilità e costi contenuti, accoppiati a brevi tempi di realizzazione. Un contributo in tale direzione è venuto dalla innovazione tecnologica volta alla progettazione e realizzazione di sensori miniaturizzati che rappresentano strumenti flessibili dotati di grandi potenzialità applicative.

In questo ambito, il CO.RI.S.T.A. (Consorzio di Ricerca su Sistemi di Telesensori Avanzati), sulla base delle esperienze già acquisite, sta da tempo portando avanti attività di ricerca per la progettazione, realizzazione e validazione di sistemi di telerilevamento aerospaziale e di rilevamento in situ miniaturizzati volti al controllo ed alla gestione del territorio. In particolare, nell'ambito del controllo delle emissioni gassose e degli agenti inquinanti in atmosfera, il CO.RI.S.T.A. sta sviluppando uno spettrometro ad immagine ad alta risoluzione (HISPEC), compatto e di costi contenuti utilizzabile sia su piattaforme aviotrasportabili sia da terra. Per quanto riguarda la salvaguardia del patrimonio artistico e culturale, il CO.RI.S.T.A. è responsabile di un progetto finanziato dal MURST relativo allo studio ed alla realizzazione di sistemi di telerilevamento innovativi per l'individuazione di preesistenze di interesse archeologico, che lo vede tra l'altro impegnato nella realizzazione di una sonda, ossia di un dispositivo avanzato per l'osservazione poco invasiva del sottosuolo, composta da due moduli, denominati geoscopio e

geolidar, rivolti il primo alla misura di proprietà chimico-fisiche del terreno ed il secondo all'analisi volumetrica di cavità sotterranee.

HISPEC (*High resolution Spectrometer*)

Lo spettrometro HISPEC (*High resolution Spectrometer*) è un dispositivo progettato dal CO.RI.S.T.A. nell'ambito di un programma finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), ed attualmente in corso di realizzazione. Esso è un prototipo innovativo di spettrometro ad immagine ad alta risoluzione che opera nella regione del vicino ultravioletto e visibile, in grado di misurare la distribuzione spaziale e spettrale della radiazione elettromagnetica che giunge dalla scena osservata. Ciò consente non solo di individuare significative anomalie dello spettro elettromagnetico che possono indicare la presenza di particolari sostanze, ma anche di valutare la posizione spaziale e la forma delle zone caratterizzate da queste anomalie.

Un particolare accento allo studio è stato rivolto all'analisi dell' SO_2 . L'anidride solforosa ed i suoi prodotti di reazione (aerosol, H_2SO_4) sono tra i componenti più significativi in termini d'impatto sulla fisica e sulla chimica della nostra atmosfera. L' SO_2 è uno degli indicatori dell'inquinamento ambientale, in particolare nelle grandi città e negli insediamenti industriali, ed è fra gli elementi più attivi rilasciati durante le eruzioni vulcaniche. Il monitoraggio dell'anidride solforosa è pertanto legato non solo all'analisi dell'inquinamento, ma anche alla possibilità di studiare fenomeni precursori di eruzioni vulcaniche, visto che cambiamenti nelle concentrazioni di gas emessi in aree vulcaniche sembrerebbero legati a movimenti magmatici al di sotto della superficie terrestre. Come è noto, l' SO_2 presenta una forte banda di assorbimento nell'intervallo spettrale 260-340 nm ed una più debole tra i 340 e 390 nm, ma, in contrasto con l'ozono e nonostante la simile struttura geometrica ed elettronica, tali bande di assorbimento presentano un andamento quasi esclusivamente discreto e più modulato. Da qui la necessità di realizzare un sistema di telerilevamento che operasse nella regione del vicino UV-visibile ad elevata risoluzione spettrale (0.5 nm).

Il sensore, le cui dimensioni sono 30 cm \times 40 cm \times 18 cm, è costituito da tre sottosistemi: le ottiche di ingresso, lo spettrografo ed il rivelatore d'immagine. Le ottiche d'ingresso, il cui *raytracing* è riportato in figura (1), formano l'immagine di una porzione *across-track* della scena osservata sulla fenditura d'ingresso dello spettrografo.

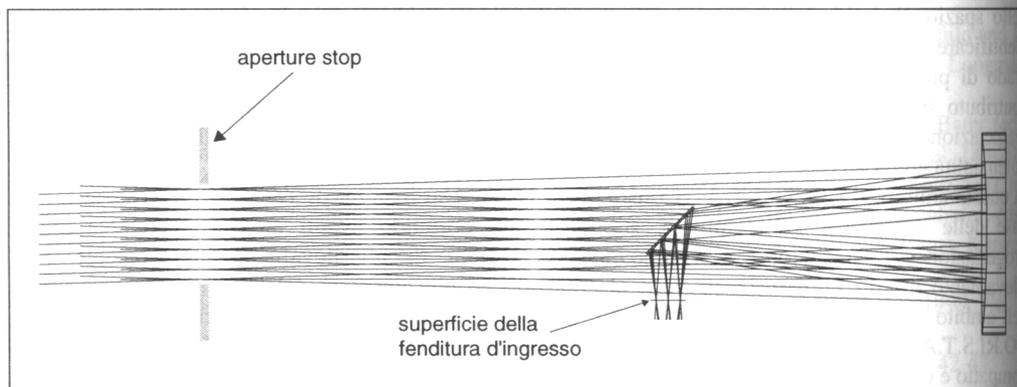


Figura 1 – Simulazione di raytracing relativa alle ottiche d'ingresso di HISPEC.

Esse sono costituite da uno specchio primario sferico e da un secondario piano inclinato a 45 gradi rispetto all'asse ottico. La lunghezza focale del sistema ottico è di 200mm; l'*f-number* pari a 4 consente una buona raccolta di luce; l'utilizzo di sole ottiche riflettive garantisce l'assenza di aberrazione cromatica e la possibilità di utilizzare lo strumento sia nel visibile che nel vicino

ultravioletto. La configurazione monocentrica (Smith, 1990) rende la qualità d'immagine uniforme su tutto il campo di vista e le aberrazioni residue sono minimizzate in modo da essere trascurabili rispetto a quelle introdotte dallo spettrografo.

Lo spettrografo (figura (2)) collima la radiazione focalizzata sulla fenditura d'ingresso, la cui larghezza è 50 µm, la disperde spettralmente e la rifocalizza sul piano focale d'uscita dove si formano le immagini (repliche) della fenditura alle diverse lunghezze d'onda. Lo strumento è costituito da due specchi sferici corretti per l'astigmatismo, montati in configurazione *Cross Czerny Turner*, e da una torretta tripla motorizzata che consente di utilizzare alternativamente diversi reticoli di diffrazione (300 l/mm con risposta ottimizzata a 500 nm, 1200 l/mm con risposta ottimizzata a 500 nm, 1200 l/mm con risposta ottimizzata a 330 nm). Il rivelatore, posto nel piano focale, è un CCD (*Charge Coupled Device*) di dimensioni 30 mm × 12 mm, dotato di 2000×800 pixel. L'intero sistema è poi controllato in modo remoto da un PC portatile. Le specifiche tecniche di HISPEC sono riportate nella tabella 3. La risoluzione spaziale del sistema è tale da poter distinguere dettagli di 3 m da 5000 m d'altezza, quando lavora con il reticolo a 1200 l/mm e con una immagine parziale del campo focale.

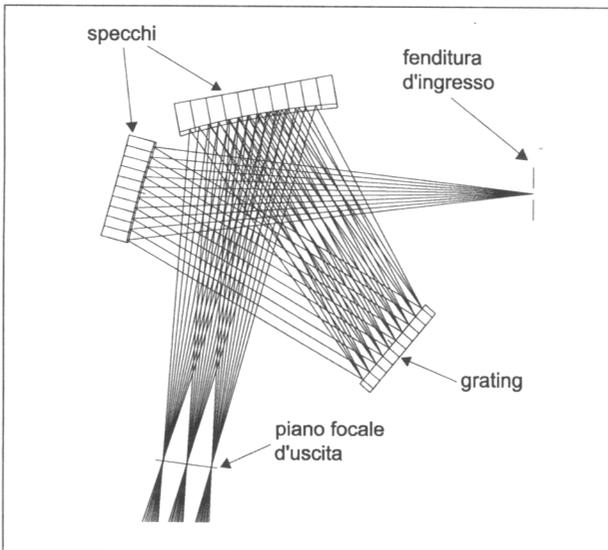


Figura 2– Raytracing relativo alle ottiche interne allo spettrometro.

Campo di vista across track	3,4°
Risoluzione spaziale	100 punti – reticolo 1200 l/mm e CCD <i>partial image</i> 25 punti – reticolo 300 l/mm e CCD <i>full image</i>
Range spettrale	280-320 nm – reticolo 1200 l/mm e CCD <i>partial image</i> 270-750 nm – reticolo 300 l/mm e CCD <i>full image</i>
Risoluzione spettrale	0.5 nm – reticolo 1200 l/mm e CCD <i>partial image</i> 2 nm – reticolo 300 l/mm e CCD <i>full image</i>
Minima radianza spettrale rivelabile	10^{-4} W/cm ² sr µm

Tabella 3 – Tabella riassuntiva delle specifiche di funzionamento del sistema.

Geoscopio e Geolidar

L'utilizzo di tecniche di osservazione remota per indagini del sottosuolo trova applicazione in svariate aree di ricerca tra le quali l'archeologia. In questo ambito, si collocano le attività che il CO.RI.S.T.A. sta svolgendo per conto del MURST volte a progettare e realizzare sistemi di

telerilevamento innovativi per l'individuazione e l'analisi di aree archeologiche. Particolarmente interessante nell'ambito delle indagini poco invasive di siti archeologici è il geoscopio. Tale apparato, progettato e realizzato dal consorzio, è in grado di rilevare, acquisire, presentare all'utente ed archiviare dettagliate informazioni sulle caratteristiche strutturali del sottosuolo, al fine di ricavare dati sulla eventuale presenza di resti di interesse archeologico. L'esame del terreno è effettuato praticandovi un foro e facendovi poi penetrare una testa di misura nella quale sono alloggiati una telecamera, un sensore di umidità e temperatura miniaturizzati. La telecamera è composta da una testa cilindrica (17 mm diametro; 39 mm lunghezza), in cui trovano alloggiamento un obiettivo (profondità di campo 10 mm - ∞ ; *f-number* 1.8; lunghezza focale 3 mm) e un rivelatore CCD *interline transfer* a colori a 752×582 pixel. L'immagine viene generata illuminando le pareti del foro con un sistema di fibre ottiche che trasportano la luce prodotta da sei lampade alogene miniaturizzate ad alta efficienza. I sensori di umidità e temperatura sono invece alloggiati in un cilindro di 13.5 mm di diametro e 70 mm di lunghezza. Il sensore di temperatura è un Pt 100 IEC 751 1/1 DIN Classe B e l'elemento sensibile è costituito da un conduttore di platino, la cui resistenza varia pressoché linearmente con la temperatura. Il sensore di umidità è invece costituito da un condensatore la cui capacità è funzione dell'umidità relativa. Tutti i sensori sono dotati di unità di controllo remoto ed alimentatori. La testa di misura è dotata anche di un accurato sistema per la determinazione del posizionamento, composto da due sensori per la misurazione della profondità e dell'inclinazione della perforazione, ritenuta condizione indispensabile per i sistemi di ausilio agli scavi. In questa configurazione, la sonda riesce a risolvere dettagli di 0.001 m e li localizza con un'accuratezza di 0.007 m, in un intervallo da 0 a 10 m e riesce a misurare temperatura ed umidità del terreno con una accuratezza di 0.37°C nell'intervallo compreso tra -20°C e $+80^\circ\text{C}$ e di 1% e 2% in umidità relativa negli intervalli di misura [0, 90%] e [90%, 100%]. Poiché tra i resti antropici oggetto dell'indagine, spesso si possono individuare cavità sotterranee come abitazioni, templi, tombe, forni, pozzi, cisterne e acquedotti, è stato concepito un ulteriore modulo, il geolidar, che, calato all'interno di una cavità sotterranea, ne misuri la volumetria (dimensioni e forma). Tale modulo è basato sul principio del radar ottico ((Measures, 1992), (Jelalian, (1992), Mamon et al. (1978)), ossia sulla misura del tempo di andata e ritorno di un impulso luminoso, comunemente noto come lidar (acronimo di "*light detection and ranging*"). Il sistema è stato progettato e realizzato in modo da risultare estremamente compatto, così da poterlo inserire nel foro praticato per l'ispezione, le cui dimensioni possono variare da un minimo di 51 mm ad un massimo di 76 mm.

Il radar ottico è composto essenzialmente da un trasmettitore e da un ricevitore. Il trasmettitore emette un impulso luminoso verso il bersaglio e il ricevitore ne osserva la frazione retrodiffusa. L'analisi del segnale rivelato in funzione di t , intervallo di tempo fra emissione e ricezione, permette dunque di determinare R , distanza fra radar ottico e bersaglio, poiché la relazione fra R e t è data semplicemente da:

$$R = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

dove c è la velocità della luce. Lo schema ottico del dispositivo è delineato in figura (5). Il laser, del tipo Nd:YAG con triplicazione di frequenza (Pedrotti, Pedrotti, 1993), connesso ad un'unità di alimentazione e raffreddamento, costituisce la sorgente dell'impulso luminoso emesso dal trasmettitore. Tale sorgente emette brevi impulsi di radiazione ultravioletta che vengono condotti nella cavità di cui si desidera determinare la volumetria tramite fibra ottica. Il fascio, così trasportato, è ricollimato e orientato in una ben precisa direzione dall'ottica di scansione, costituita da due prismi capaci di ruotare indipendentemente, grazie all'azionamento di due motori passo-passo. Parte della radiazione retrodiffusa dal bersaglio, dopo esser stata raccolta e filtrata dall'ottica di ricezione (filtro interferenziale), raggiunge il fotomoltiplicatore che la trasforma in un segnale elettronico.

L'intero sistema (geoscopio e geolidar) è pilotato tramite computer dove fra l'altro risiede un sofisticato software che ne consente la gestione ed il controllo, oltre all'acquisizione e visualizzazione dei dati.

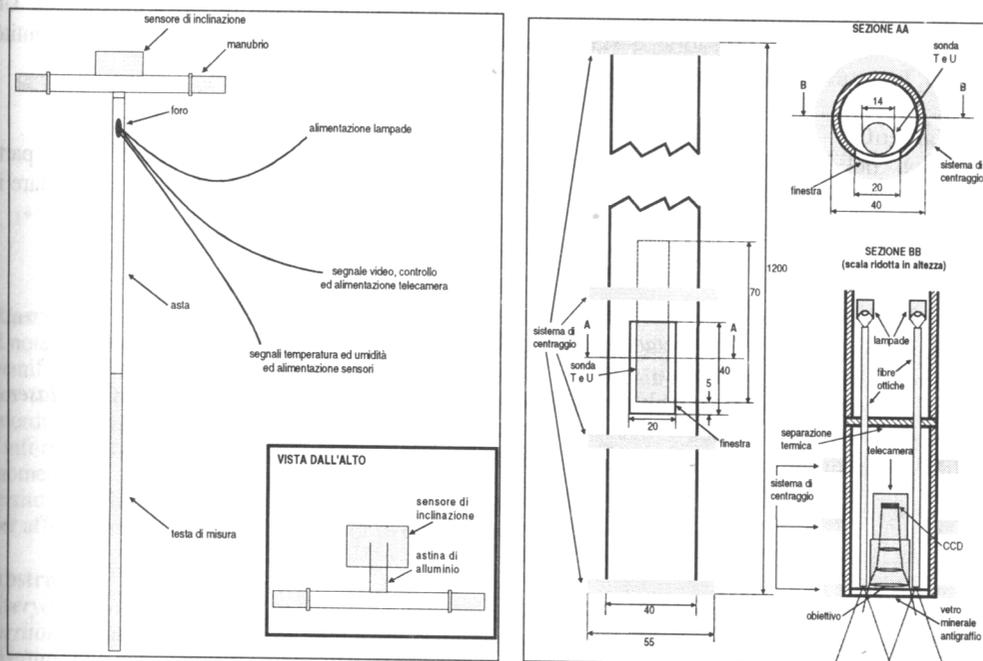


Figura 4- Testa di misura (destra) e sistema di introduzione della testa (le misure sono espresse in mm).

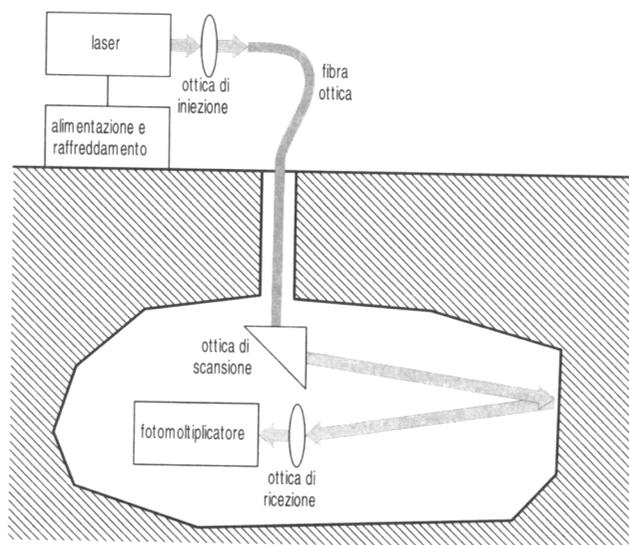


Figura 5- Schema ottico del geolidar.

Conclusioni

L'utilizzo di tecniche di telerilevamento trova ormai molti campi di applicazioni. In questo lavoro, sono stati presentati alcuni esempi di sensori per l'osservazione a distanza, risultati delle attività di ricerca portate avanti in questi ultimi anni dal CO.RI.S.T.A.. In particolare, si è voluto porre l'accento sulle tecniche per l'osservazione dei gas atmosferici e sull'impiego di tecniche di telerilevamento per l'analisi di perforazioni nel sottosuolo in prossimità di siti archeologici. Un aspetto sicuramente indispensabile è stato l'utilizzo di sensori miniaturizzati, che ha garantito flessibilità, versatilità e facile impiego di tali sistemi.

Ringraziamenti

Lo sviluppo del geolidar ha richiesto un notevole sforzo di miniaturizzazione delle parti meccaniche. Per il valido e ingegnoso contributo in tal senso, si ringraziano in modo particolare il Sig. Giuseppe Passeggio (disegno) e il Sig. Davide Pontoriere (realizzazione).

Riferimenti

- Smith, W. J., (1990) - *Modern optical engineering* - McGraw-Hill
Measures, R. M., (1992) - *Laser remote sensing* - Krieger Publishing Company
Jelalian, A. V., (1992) - *Laser radar systems* - Artech House
Mamon, G., Youmans, D. G., Sztankay, Z. G., Mongan, C. E., (1978, March) - *Pulsed GaAs laser terrain profiler* - Applied Optics
Pedrotti, F. L., Pedrotti, L. S., (1993) - *Introduction to optics*, Prentice Hall