



Ricerca di Sistema elettrico

Definizione di uno schema prototipale di un sistema spettroscopico d'immagine per il monitoraggio delle zone di stoccaggio della CO₂

Anna Sytchkova e Angela Piegari

DEFINIZIONE DI UNO SCHEMA PROTOTIPALE DI UN SISTEMA SPETTROSCOPICO D'IMMAGINE PER IL MONITORAGGIO DELLE ZONE DI STOCCAGGIO DELLA CO₂

Anna Sytchkova e Angela Piegari (ENEA)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Progetto B2- "Polo Tecnologico del Sulcis: tecnologie e metodologie low carbon e edifici a Carbon' e Edifici ad energia quasi Zero (nZEB)"

PARTE A1-SISTEMI AVANZATI DI MONITORAGGIO E DIAGNOSTICA PER LA COMBUSTIONE E LA RILEVAZIONE DI "CO₂ LEAKAGE"

Ob. b.2 – Sistemi di rilevazione della CO₂

Responsabile del Progetto: Dr. Franca Rita Picchia, ENEA

Indice

1	SOMMARIO	4
2	INTRODUZIONE ALLE PROBLEMATICHE DEL MONITORAGGIO REMOTO DELLE ZONE DI STOCCAGGIO DI CO ₂	5
3	DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ SVOLTA	6
3.1	I FILTRI UNIFORMI PASSA-BANDA STRETTO NEL MWIR.....	7
3.2	MODELLO RADIOMETRICO: STUDIO PRELIMINARE	9
3.2.1	<i>Radiazione del corpo nero</i>	14
3.2.2	<i>Radiometria d'immagine</i>	15
4	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	16
5	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	16
6	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	17

1 Sommario

In questo rapporto tecnico è descritta l'attività svolta con lo scopo di definire uno schema prototipale di un sistema spettroscopico per il monitoraggio real time delle zone di stoccaggio CO₂ e per il rilevamento fughe. Il sistema in analisi è concepito come composto di una camera ottica iperspettrale operante nel medio infrarosso da installare su un drone di bassa-media portata.

Tre sono le caratteristiche principali innovative del sistema: il basso peso della camera, l'ampio range spettrale di acquisizione e la possibilità dell'acquisizione/elaborazione quasi immediata dei dati. Alla base di questi vantaggi c'è l'utilizzo delle ottiche interferenziali innovative sviluppate *ad hoc*.

Nel secondo anno di attività lo studio si è concentrato su due filoni principali

- l'attività sperimentale mirata allo sviluppo dei filtri interferenziali variabili nel MWIR (medio infrarosso)
- lo studio teorico preliminare del budget radiometrico

2 Introduzione alle problematiche del monitoraggio remoto delle zone di stoccaggio di CO₂

Tra le tecnologie CCS (*Carbon Capture Storage*) mirate alla riduzione delle emissioni dei gas serra, quella dello stoccaggio dell'anidride carbonica (CO₂) è ormai una pratica diffusa nei paesi tecnicamente avanzati e alcune istituzioni Italiane fanno parte della Rete Europea d'Eccellenza di Stoccaggio Geologico della CO₂ (The European Network of Excellence on the Geological Storage of CO₂, <http://www.co2geonet.com>). Dopo anni di ricerca e attività connessa alla gestione dei siti di stoccaggio di CO₂, rimangono tuttavia problematiche aperte. Tra queste c'è il problema del monitoraggio che deve essere sia affidabile sia veloce.

I sistemi di monitoraggio più diffusi dei gas serra possono essere divisi in due categorie. Una categoria si basa sulle reti di sensori localmente posti al livello del suolo. In alternativa ci si avvale dei dati multispettrali satellitari acquisiti dalle orbite terrestri a circa 400 km di altezza. Entrambi gli approcci hanno i loro punti di forza e di debolezza. Se nel primo caso i dati raccolti possono vantare una precisione sia volumetrica sia spaziale, essi sono lenti da raccogliere ed elaborare. Nel secondo caso i dati sono disponibili in tempi più brevi, ma hanno bassa risoluzione spaziale e insufficiente precisione volumetrica. La combinazione dei due approcci complementari migliora la qualità del monitoraggio ma non fornisce comunque un metodo di controllo dei livelli di gas in tempo reale e con buona risoluzione spaziale, due parametri essenziali per il monitoraggio affidabile delle zone di stoccaggio dell'anidride carbonica.

L'implementazione dei sistemi di spettroscopia d'immagine per le problematiche che necessitano il monitoraggio ambientale remoto sta diventando sempre più diffusa. Sia dallo spazio sia da aeromobili, gli spettrometri portatili forniscono dati multispettrali (*MSI, Multispectral Imaging*) o iperspettrali (*HSI, Hyperspectral Imaging*) utili per il rilevamento di molteplici parametri fisico-chimico ambientali. Il rilevamento può essere basato sugli spettri di assorbimento della luce in atmosfera e i parametri d'interesse vengono mappati lungo la superficie terrestre. Tali sistemi permettono una diagnostica veloce di ampie zone.

L'estensione dello spettro elettromagnetico della radiazione acquisibile da tali spettrometri permetterebbe l'accesso a più informazioni, rispetto allo stato dell'arte di questi strumenti che attualmente funzionano principalmente nel visibile e nell'infrarosso molto vicino (tipicamente 400-1000 nm, a volte estendibile fino a 2500 nm) e con un numero di bande spettrali ancora non molto elevato (tipicamente qualche decina).

Anche per le zone di stoccaggio di CO₂ è stato sviluppato pochi anni fa un sistema HSI di rilevamento diretto della CO₂ ("Testing Hyperspectral Remote Sensing Monitoring Techniques for Geological CO₂ Storage at Natural Seeps", <http://earth.esa.int/workshops/gasoil2010/Bateson.pdf>). Il sistema, composto da una camera HSI montata su un drone, è stato assemblato con componenti disponibili sul mercato ottimizzando le prestazioni del sistema in toto. Sono state individuate molte problematiche che non hanno permesso sinora un rilevamento affidabile della CO₂ con questo sistema.

Negli anni 2000-2010 l'ENEA ha partecipato allo sviluppo di alcuni prototipi di sistemi HSI per le missioni spaziali dell'Agenzia Spaziale Europea (ad esempio ESA-ESTEC contract N. 18729/04/NL/DC "Ultra-compact medium-resolution spectrometer for land application") e per applicazioni nel campo della salvaguardia dei beni culturali. Sulla base di questa esperienza [3, 4], per il triennio 2015-2017 del Programma Ricerca Sistema Elettrico è stato proposto lo sviluppo di un sistema innovativo per il monitoraggio remoto che ha lo scopo di velocizzare e semplificare il processo di rilevamento dei livelli di emissione della CO₂ sui ampi territori della zona di stoccaggio. La camera HSI dovrà essere ultraleggera per essere trasportata da un

drone di basso-medio carico e dovrà fornire i dati nelle bande spettrali finora non acquisibili con i sistemi di questo tipo. Entrambi gli scopi possono essere raggiunti con l'impiego di filtri ottici interferenziali variabili sviluppati *ad hoc* in sinergia con gli altri elementi della camera HSI. Il sistema permette la misura iperspettrale remota del livello di assorbimento ottico dovuto alla presenza nell'aria dell'anidride carbonica e quindi il rilevamento di variazioni di assorbimento indicative per il controllo di fuoriuscite del gas. Poiché il monitoraggio HSI basato sull'acquisizione del segnale mirato alla banda di assorbimento di CO₂ a 2,005 µm si è rivelato poco efficace [2], si mira alla realizzazione di una camera iperspettrale operante nel medio IR (MWIR, lunghezze d'onda 2-5 µm). Tale scelta permette il monitoraggio non solo alla banda di 4,3 µm della CO₂; l'accesso al range spettrale più ampio offre una serie di vantaggi che riguardano ad esempio la taratura della misura ed in particolare le fasi successivi all'acquisizione dei dati, cioè di elaborazione ed interpretazione delle immagini spettrali.

3 Descrizione dell'attività svolta

Nel primo anno di attività è cominciato uno studio di fattibilità della misura remota del livello di assorbimento ottico, che ha portato a un disegno preliminare di due componenti fondamentali della camera iperspettrale quali la testa ottica e il filtro interferenziale. Nel secondo anno di attività sono stati realizzati componenti (coatings) a multistrato sui quali si basano i filtri ottici, che rappresentano l'elemento centrale del sistema spettroscopico, al fine di individuare eventuali problematiche di tipo opto-meccanico: morfologia degli strati, adesione e durezza del coating. Si è lavorato sulla selezione dei materiali da utilizzare e sull'ottimizzazione dei parametri del processo di deposizione di tali materiali in forma di strati sottili mediante sputtering (r.f.) a radio frequenza (potenza, flussi di gas, pressione, ecc). Sono stati condotti esperimenti di realizzazione di campioni di alcuni materiali (silicio, allumina, argento, ossido di silicio) variando i parametri del processo. Ciò ha portato alla definizione delle condizioni ottimali per garantire caratteristiche opto-meccaniche dei coatings adatte all'applicazione. Oltre agli obiettivi posti e raggiunti per la seconda annualità, ai fini della successiva ottimizzazione del design ottico del filtro, si è proseguito con uno studio di modello radiometrico della misura di rilevamento remoto da UAV con il sistema prototipato nel primo anno e considerando le caratteristiche del luogo di applicazione. Tale studio sta alla base della scelta dei componenti della camera (off-the-shelf) come ad esempio il detector. Le conclusioni di questo studio preliminare hanno permesso di programmare le attività sperimentali e teoriche necessarie per completarlo nella terza annualità.

La Tabella 1 riassume gli obiettivi posti nella seconda annualità al confronto con i risultati raggiunti per questi obiettivi.

Tabella 1- . Obiettivi posti nella seconda annualità e i risultati raggiunti

Obiettivi posti nella seconda annualità	Risultati raggiunti
Ottimizzazione dei parametri del processo di deposizione (sputtering a radio frequenza): potenza, flussi di gas, pressione, ecc.	E' stata condotta una serie di esperimenti di realizzazione di campioni di materiali selezionati (silicio, allumina, argento, ossido di silicio) variando i parametri del processo. Ciò ha portato alla definizione delle condizioni ottimali per garantire caratteristiche opto-meccaniche dei coatings adatte all'applicazione.
Realizzazione di coating uniformi a multistrato al fine di individuare eventuali problematiche di tipo	Alcuni multistrati e un filtro uniforme passa-banda stretto nel MWIR (medio infrarosso) sono stati

opto-meccanico: morfologia degli strati e loro interfacce, adesione e durezza del coating.	realizzati ai fini delle prove opto-meccaniche. I campioni sono stati caratterizzati per loro trasmittanza, utilizzando uno spettrometro FT-IR commerciale. I test di adesione e lo scotch test effettuati confermano le buone qualità meccaniche dei materiali a singolo strato, a multistrato e del filtro metallo-dielettrico passa-banda stretta.
Prove di resistenza dei materiali e di stabilità delle loro proprietà ottiche a seguito dell'esposizione alle condizioni di utilizzo del filtro: range di temperature di esercizio e valori di umidità elevata.	L'aspetto visivo e lo spettro di trasmittanza invariati in 4 mesi confermano la stabilità del filtro nelle condizioni di laboratorio e a seguito dell'esposizione all'ambiente esterno. Sono in corso le prove di umidità elevata che saranno completate a breve.
Ottimizzazione del design ottico del filtro basata sulle caratteristiche specifiche di filtri interferenziali per la spettroscopia di gas: range spettrale di lavoro, performance ottica necessaria (larghezza delle bande passanti, rapporto segnale/rumore, ecc.). Si mira alla realizzazione dei primi prototipi dei filtri variabili su cui si basa lo spettrometro. Queste attività sono strettamente legate a un upgrade del design dello strumento e della testa ottica.	Per questo traguardo si è proseguito con uno studio del modello radiometrico della misura di rilevamento remoto da UAV con il sistema prototipato nel primo anno e considerando le caratteristiche del luogo di applicazione. Tale studio è stato avviato dall'ENEA e sarà sviluppato nella terza annualità in collaborazione con la PMI EIE Space Technologies già coinvolta nel progetto. Sono in corso alcune modifiche del sistema di deposizione dei filtri variabili per consentire un controllo online del processo di fabbricazione adatto ai materiali utilizzati nel MWIR. I primi prototipi dei filtri variabili nel vicino infrarosso sono stati realizzati con materiali trasparenti anche nel visibile.

3.1 I filtri uniformi passa-banda stretto nel MWIR

I filtri ottici interferenziali innovativi costituiscono il cuore del sistema proposto, in quanto la leggerezza della camera in maggior parte sarà dovuta all'implementazione di uno (o più) di essi, evitando l'utilizzo di ulteriori componenti ottici dispersivi di maggior peso e ingombro. A differenza della maggior parte degli spettrometri disponibili sul mercato, tra quelli operanti nel MWIR (medio infrarosso), la camera utilizza un filtro variabile come parte dispersiva nell'acquisizione dello spettro nel MWIR, approccio sinora utilizzato solo nel visibile e parzialmente nell'infrarosso molto vicino. Il filtro variabile è un filtro di tipo passabanda che seleziona strette bande di lunghezza d'onda il cui picco trasmissione si sposta lungo la superficie del filtro stesso. Tale filtro, accoppiato a un rivelatore bidimensionale, consente l'acquisizione di ciascuna banda spettrale dalla corrispondente riga del rivelatore. Le dimensioni fisiche del filtro devono coincidere con le dimensioni del rivelatore che è tipicamente lungo pochi millimetri. Le dimensioni ridotte e la variazione sulla superficie rendono la realizzazione di tale filtro piuttosto complessa.

I problemi tecnologici da affrontare nella realizzazione dei filtri riguardano il processo di fabbricazione del dispositivo e la scelta dei materiali per la realizzazione dei multistrati interferenziali sulle finestre ottiche cosiddetti substrati. Le finestre quindi devono essere rivestite con strati di materiali trasparenti nel MWIR (ossidi o solfuri di metalli). Come materiali di rivestimento più opportuni sono stati scelti silicio amorfo e

ossido di alluminio (Si e Al_2O_3). Sono state selezionate finestre ottiche in silicio cristallino (Si) per la migliore aderenza dei coating (compatibilità dei materiali del substrato e dei film sottili) e per la sua trasparenza nel range spettrale cui si mira.

Nel secondo anno di attività sono stati realizzati mediante la tecnica di r.f. sputtering alcuni multistrati e un filtro uniforme passa-banda stretto nel MWIR ai fini delle prove opto-meccaniche. I campioni sono stati caratterizzati per loro trasmittanza, utilizzando uno spettrometro FT-IR (infrarosso a trasformata di Fourier) commerciale. I test di adesione e lo scotch test effettuati confermano le buone qualità meccaniche dei materiali a singolo strato, a multistrato e del filtro metallo-dielettrico passa-banda stretta.

La trasmittanza spettrale di un filtro uniforme passa-banda stretto è mostrata in Fig.1. Il filtro è stato progettato con una sequenza di 23 strati di materiali metallo-dielettrico ed è stato realizzato con la tecnica dello r.f. sputtering. I materiali dielettrici utilizzati sono silicio (Si, indice di rifrazione alto) e ossido di alluminio (Al_2O_3 , indice di rifrazione basso); lo strato metallico è argento (Ag).

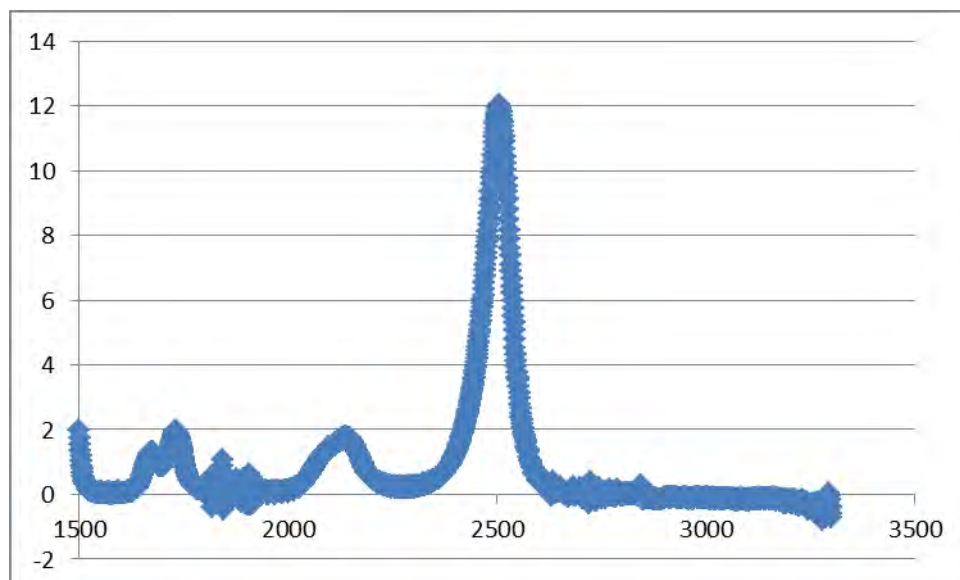


Fig. 1. Trasmittanza misurata del filtro uniforme in funzione della lunghezza d'onda (in nm). Il picco di trasmissione è centrato a 2500 nm

La banda di trasmissione è stata centrata a 2500 nm (invece che a 4300 nm) per abbreviare i tempi di fabbricazione. Infatti, la velocità di deposizione dell'ossido di alluminio è estremamente bassa, quindi si sta valutando l'implementazione di un altro ossido compatibile, come ad esempio l'ossido di silicio (SiO_2). Una velocità di deposizione così bassa (alcune ore per un singolo strato) comporta una instabilità del processo e perciò peggiora l'affidabilità del controllo dello spessore. Gli errori negli spessori degli strati realizzati si ripercuotono sulla risposta ottica complessiva del filtro.

Sono in corso alcune modifiche del sistema di deposizione dei filtri variabili per consentire un controllo durante la fabbricazione adatto ai materiali utilizzati nel MWIR. Nel frattempo alcuni prototipi dei filtri variabili sono stati realizzati nel vicino infrarosso con impiego di altri materiali che sono trasparenti anche nel visibile sui substrati vetrosi, Fig. 2.

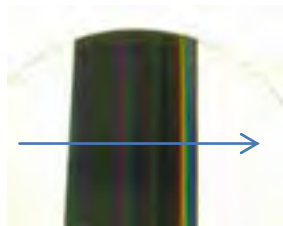


Fig. 2. Esempio di filtro variabile passa-banda stretto metallo-dielettrico per il -vicino infrarosso. Nella direzione della variazione delle caratteristiche del filtro (indicata con la freccia) il picco di massima trasmissione cambia posizione spettrale da 900 nm a 2500 nm..

L'aspetto visivo e lo spettro di trasmittanza invariati in 6 mesi confermano la stabilità del filtro nelle condizioni di laboratorio e a seguito dell'esposizione all'ambiente esterno.

3.2 Modello radiometrico: studio preliminare

Il rilevamento nel MWIR (3-5 μm) permette l'accesso alle bande spettrali di assorbimento ottico di molte specie gassose, e in particolare la banda intorno a 4.3 μm della CO_2 , Fig. 3, vantaggiosa in quanto meno sovrapposta con le bande di assorbimento delle altre specie gassose presenti nell'atmosfera, Fig. 4. In particolare la banda di rilevamento tradizionale attorno a 2.7 μm è sovrapposta con quelle dell'acqua, mentre a 4.3 μm l'assorbimento dell'acqua è di sette ordini di grandezza inferiore a quello della CO_2 concentrata a 300 ppm. I valori di assorbimento di specie gassose atmosferiche a diverse concentrazioni tipiche di molte zone d'esercizio sono reperibili nel database HITRAN (L.S. Rothman et al., "The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database," J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 110, 533–572 (2009)).

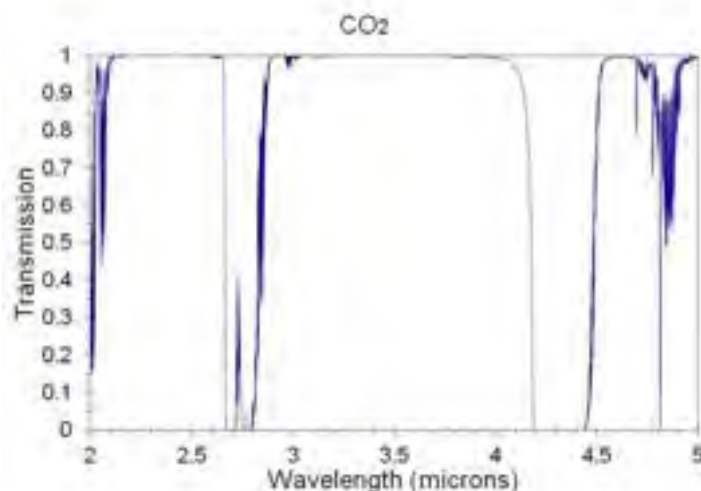


Fig. 3. Spettro (bande di assorbimento) della CO_2 nell' infrarosso vicino (NIR) e medio (MWIR)

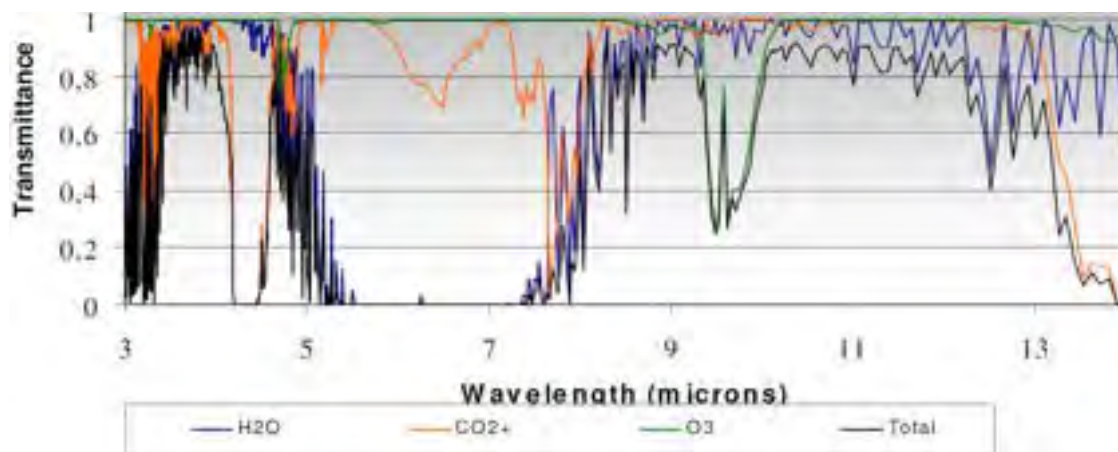


Fig. 4. Spettro della CO₂ nell'infrarosso a confronto con le principali specie gassose atmosferiche.

La difficoltà principale di rilevamento passivo nel MWIR è il livello basso della radiazione riflessa/emessa dalla superficie, e quindi l'intensità bassa della luce utile per la misura, notevolmente minore rispetto alle altre regioni spettrali. Fig. 5 illustra i livelli di radiazione utile per le misure ottiche dai satelliti sulle orbite terrestri basse, cioè appena fuori dell'atmosfera. Si nota che l'energia disponibile per la misura nel MWIR è di ordini di grandezza inferiore rispetto al NIR e al visibile. Per le misure da droni è ragionevole aspettarsi però livelli di radiazione più favorevoli a causa delle dimensioni della colonna d'aria notevolmente ridotte e la vicinanza al suolo che funge da sorgente di radiazione.

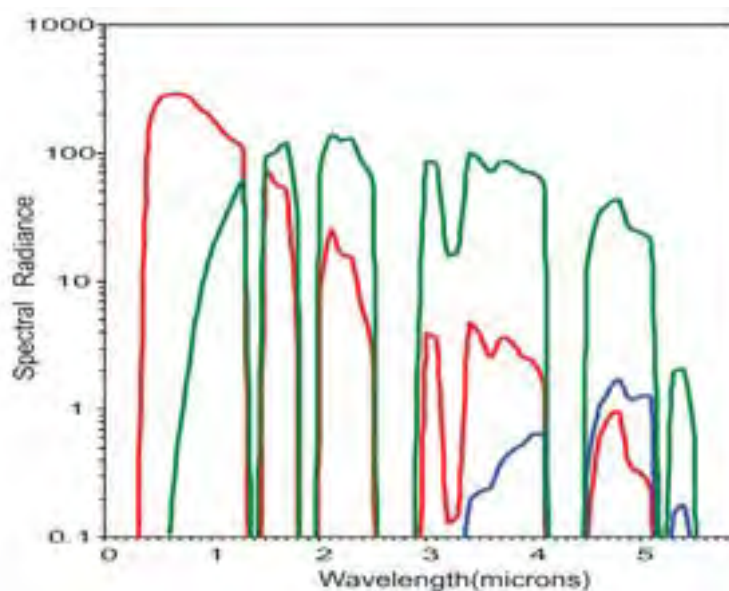


Fig. 5. Radianza spettrale (in $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) appena fuori dell'atmosfera terrestre. La curva rossa è la radiazione solare se riflessa dalla superficie terrestre al 100%. La curva blu è la radiazione proveniente da un corpo a terra che è a temperatura di 300°K. La curva verde corrisponde alla radiazione causata da un incendio boschivo (a 1400°K) che occupa 1% del instantaneous field of view (IFOV) dello strumento, mentre il rimanente 99% del IFOV si trova a 300°K [Casey I. Honniball et al., "The Miniaturized Infrared Detector of Atmospheric Species (MIDAS) a low-mass, MWIR low-power hyperspectral imager", Proc. of SPIE Vol. 9819 (2016) 98190J-1].

Figura 6 rappresenta schematicamente la misura su campo. La camera acquisisce le immagini del suolo sottostante attraverso l'atmosfera e l'eventuale nuvola di gas formatasi, misurando l'intensità della radiazione spettrale incidente sul ciascun pixel del suo detector CCD.

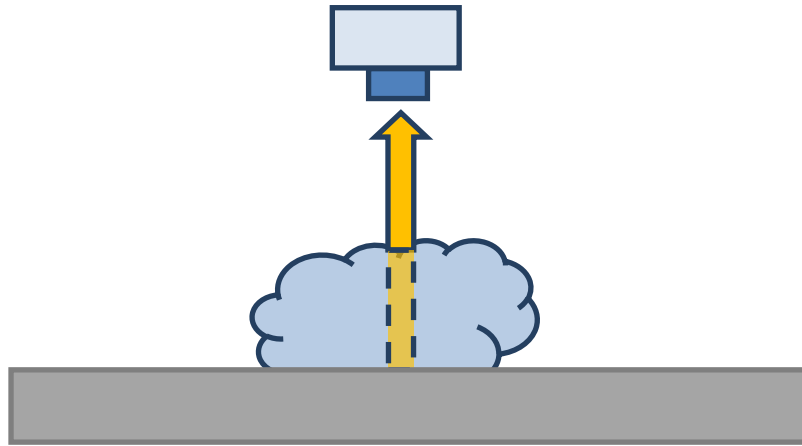


Fig. 6. Schema della misura su campo.

Per elaborare un modello radiometrico della misura si assume quanto riportato di seguito:

1. Essendo la CO_2 il gas più pesante tra quelli normalmente presenti nell'atmosfera e presumendo bassi flussi dalle fessure di fuoriuscita, la nuvola della CO_2 formatasi tenderà a rimanere più vicino al suolo. Si può quindi considerarla aderente al suolo. Per questo motivo il gradiente termico tra il suolo e l'interno della nuvola può essere considerato trascurabile e quindi si può supporre che il gas e il suolo si trovino in equilibrio termico a temperatura τ .
2. La nuvola del gas è caratterizzata dalla sua trasmittanza T_{gas} . L'emissività del gas è trascurabile.
3. Su ogni pixel incide radiazione spettrale condizionata da un singolo valore della concentrazione del gas C_{gas} nella nuvola, omogeneo lungo il percorso della luce attraverso la nuvola in ogni singola colonna di osservazione nel IFOV.
4. L'atmosfera tra la camera e la nuvola del gas non è emissiva in quanto si trova a temperatura non superiore a quella della nuvola del gas e contiene CO_2 in concentrazione tipica per l'atmosfera neutra e quindi molto minore della C_{gas} . Questo tratto di atmosfera ha trasmittanza T_a .

L'emissività $\varepsilon_{\text{bgnd}}$ del suolo è spesso considerata essere molto grande da poter trascurare la componente riflessa dal suolo della irradianza solare H e quindi poter semplificare il modello [M.A. Rodríguez-Conejo and J. Meléndez, "Hyperspectral quantitative imaging of gassources in the mid-infrared", *Appl. Opt.* 54 (2015), 142]. Questa ipotesi ereditata dalla tradizione pluriennale del HSI nel lontano infrarosso o infrarosso termico (LWIR, 8-14 μm) dove i suoli hanno emissività di circa 0.9-0.95 (per es., <http://www.optotherm.com/emiss-table.htm>), perde validità per il MWIR. Infatti, le misure effettuate sui suoli reali dimostrano che la riflettanza del suolo R_{bgnd} spesso non è trascurabile in quanto è alta in questo range spettrale [José A. Sobrino et al., "Soil emissivity and reflectance spectra measurements", *Appl. Opt.* 48 (2009), 3664], Fig. 7.

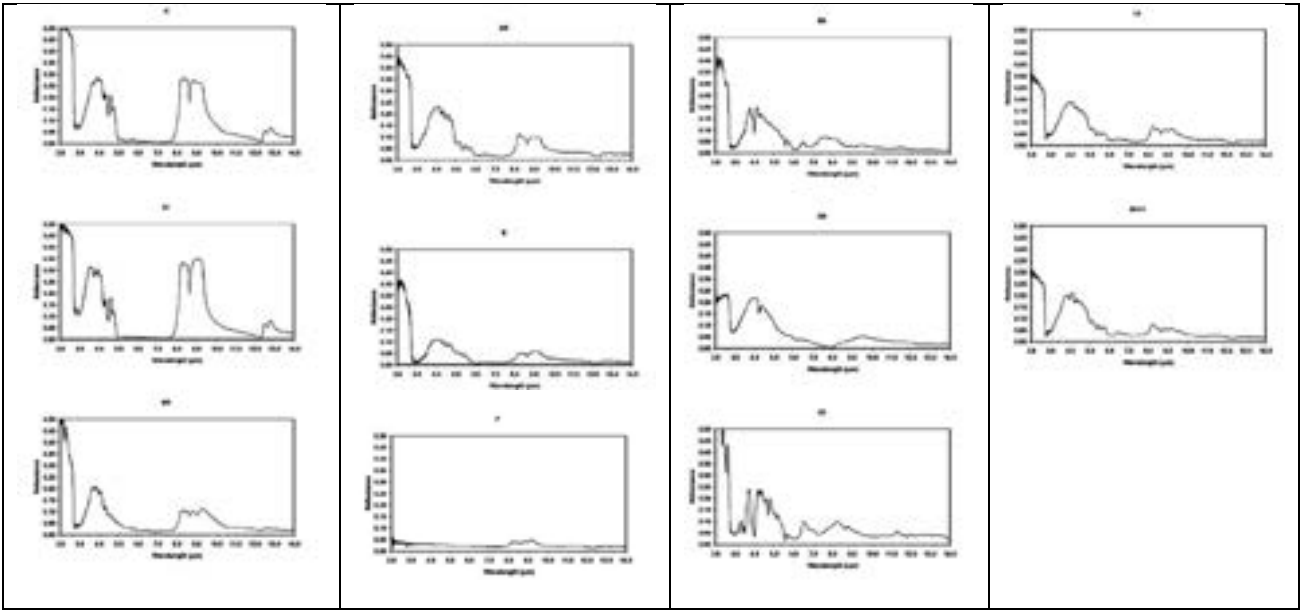


Fig. 7. Riflettanza dei suoli elencati nella Tabella 2. I grafici e la tabella sono riprodotti da José A. Sobrino et al., “Soil emissivity and reflectance spectra measurements”, Appl. Opt. 48 (2009), 3664.

Tabella 2 - Nominativi dei suoli, loro tipi e provenienza, la cui riflettanza spettrale è riportata in Fig.7

Projects	Time Period	Supported	Code	Place	Latitude	Longitude	Descriptions	Taxonomy
Sentinel-2 and Fluorescence Experiment (SEN2FLEX)	2005	European Space Agency (ESA)	BS	Barrax, Spain	39°3' N	2°6' W	characteristic bare soil with high clay content and poorly developed.	<i>inceptisol</i>
CarboEurope, Flex and Sentinel-2 (CEFLES-2)	2007-2008	ESA	B	Bordeaux, France	44°24'19" N	0°36'14.6" W	agriculture soil with high organic matter content	<i>spodosol</i>
Agricultural bio/geophysical retrieval from frequent repeat pass SAR and optical imaging (AGRISAR)	2006	ESA	LL AG	Les Landes, France Görmin, Germany	44°27'24" N 53°59'51" N	0°11'51" E 13°16'45" W	agriculture baresoil characteristic bare soil for annual crop	<i>inceptisol</i> <i>mollisol</i>
Exploitation of angular effects in land surface observations from satellites (EAGLE)	2004-2007	European Union (EU)	H	Noordwijk, Holland	52°14'35" N	4°25'39" E	red sand with high content of salts	<i>entisol</i>
HYDRA reconstructing historical dynamic of marsh flood in Doñana using remote sensing.	2008	Ministerio de Ciencia y Tecnología, España	D1 D2	Doñana National Park, Spain	36°58'49" N 37°4'18" N	6°29'48.3" W 6°16'54" W	coastal sand yellow sand used for bull ring	<i>entisol</i> <i>entisol</i>
Visit to Pastoruri glacier ^a	2008	CONIDA	P	Pastoruri, Perú	9°54'32.2" S	77°10'58" W	bare soil near glaciers	<i>rock/lands</i> <i>near ice glaciers</i>
Mount Hudson Field Campaign ^b	2002	Chilean volcanos research field campaign	CH	Hudson, Chile	45°54' S	72°58' W	volcanic ash	<i>rock/lands</i> <i>near ice glaciers</i>
Dual-use European Security IR Experiment (DESIREX)	2008	ESA	MD	Madrid, Spain	40°32'52" N	3°41'49" W	soccer field bare soil	<i>inceptisol</i>
Water use efficiency in natural vegetation and agricultural areas by remote sensing in the Mediterranean basin (WATERMED)	1999-2002	EU	M 131	Marrakech, Morocco	31°40' N	7°35' W	agriculture bare soil with high clay content	<i>leptosols</i> , <i>regosols (LP)</i>

^aP samples were collected during a visit to Pastoruri glacier in the framework of Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) of Perú regional activities

Se L^{BB} è la radianza del corpo nero di Planck e H è l'irradianza solare al livello della camera, la radianza L^{in} che arriva alla camera può essere calcolata come

$$L^{in} = L^{BB}(\tau) \cdot \varepsilon_{bgrd} \cdot T_a \cdot T_{gas} + H \cdot R_{bgrd} \cdot T_a^2 \cdot T_{gas}^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

Per ogni lunghezza d'onda λ , la trasmittanza della nuvola T_{gas} è una funzione della temperatura, del cammino ottico d e della concentrazione del gas C_{gas} e definita dalla legge di Lambert-Beer:

$$T_{gas}(\lambda, C_{gas}, \tau, d) = e^{-\alpha(\lambda, \tau) C_{gas} d} \quad (\text{Eq. 2})$$

Da non trascurare il fatto che i valori della trasmittanza dei gas variano con la temperatura in modo non omogeneo. Figura 8 fornisce alcuni esempi di come varia l'assorbimento α (e quindi la T_{gas}) della CO_2 se monitorato in alcune lunghezze d'onda. Si nota che nel range di temperature ambientali (sotto 325 °K) la variazione con la lunghezza d'onda è più importante rispetto a quanto accade a temperature più elevate.

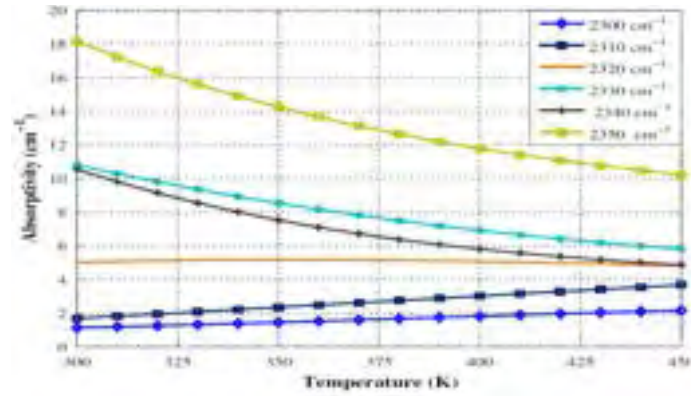


Fig. 8. Variazione dell'assorbanza della CO₂ in funzione della temperatura a diverse lunghezze d'onda. Da M.A. Rodríguez-Conejo and J. Meléndez, "Hyperspectral quantitative imaging of gassources in the mid-infrared", *Appl. Opt.* 54 (2015), 142.

Simili osservazioni sono valide per i valori della trasmittanza T_a del tratto atmosferico tra la camera e la nuvola del gas.

3.2.1 Radiazione del corpo nero

Il corpo nero a 300°K (27°C) irradia energia totale L^{BB} calcolabile usando la legge di Stefan-Boltzmann:

$$L^{BB} = 5.6697 \cdot 10^{-12} \tau^4 \frac{W}{cm^2} = 5.6697 \cdot 10^{-12} (300)^4 \frac{W}{cm^2} = 4.59 \cdot 10^{-2} W/cm^2 \quad (Eq. 3)$$

con la distribuzione spettrale avente il massimo locato alla lunghezza d'onda definita dalla legge di Wien:

$$\lambda_{max} = 2897.9 \tau^{-1} \mu m = 2897.9 (300)^{-1} \mu m = 9.66 \mu m \quad (Eq. 4)$$

e con il valore di radianza massima

$$\begin{aligned} L^{BB}_{\lambda_{max}} &= 1.288 \cdot 10^{-15} \tau^5 \frac{W}{cm^2} \mu m^{-1} = \\ &= 1.288 \cdot 10^{-15} \tau (300)^5 \frac{W}{cm^2} \mu m^{-1} = 3.13 \cdot 10^{-3} \frac{W}{cm^2} \mu m^{-1} \end{aligned} \quad (Eq. 5)$$

Per ottenere il valore della radianza del corpo nero complessiva nel range 3-5 μm , ci si avvale della procedura classica utilizzando la Fig. 8 che rappresenta la distribuzione spettrale del corpo nero (*W. Smith, "Modern Optical Engineering", McGraw Hill, 1966*). In termini del λ_{max} il range 3-5 μm corrisponde al range $3/9.66 \div 5/9.66 = 0.311-0.518$. Dalla Fig. 8 i valori corrispondenti di $L^{BB}_{\lambda}/L^{BB}_{\lambda_{max}}$ sono 0.01 e 0.25.

Moltiplicando per $L^{BB}_{\lambda_{max}}$, Eq.5, si ottengono le radianze spettrali:

$$\begin{aligned} - \text{ a } 3 \mu m \quad L^{BB}_{\lambda} &= 0.03 \cdot 10^{-3} \frac{W}{cm^2} \mu m^{-1} \\ - \text{ a } 5 \mu m \quad L^{BB}_{\lambda} &= 0.78 \cdot 10^{-3} \frac{W}{cm^2} \mu m^{-1} \end{aligned} \quad (Eqs.6)$$

Utilizzando poi la scala di frazioni della Fig. 9, si trova che la radiazione emessa sotto i 5 μm (λ relativa di 0.518) è circa 0.011, mentre solo 0.0001 è emesso sotto i 3 μm (λ relativa di 0.311). La radianza totale nel range 3- 5 μm è la differenza tra queste due frazioni ed è quindi circa 1.1% della radiazione totale del corpo nero data dalla Eq.3, ed è pari a circa $4.9 \cdot 10^{-2} W/cm^2$.

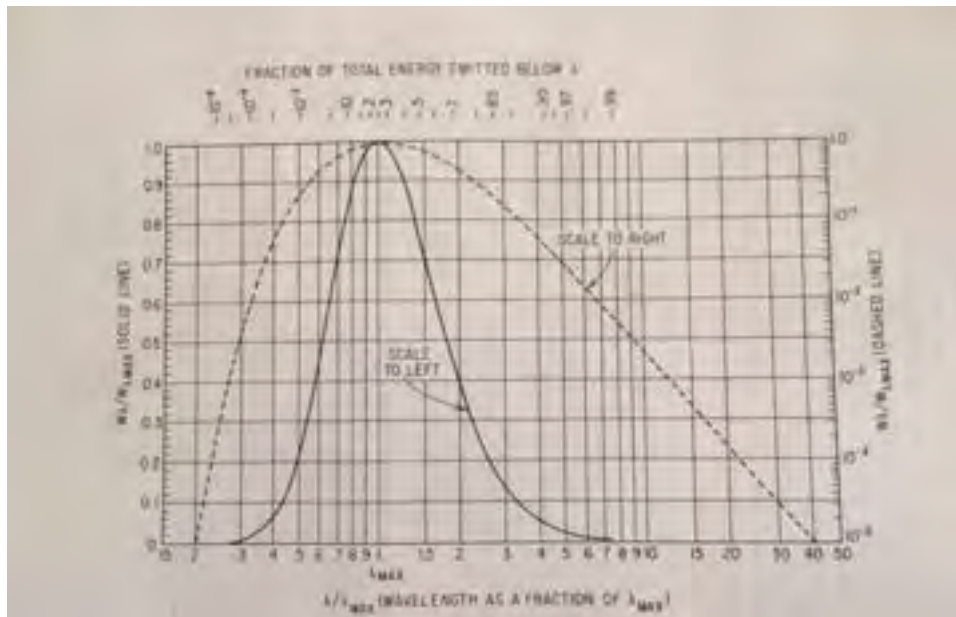


Fig. 9. Distribuzione spettrale del corpo nero. Qui $W = L^{BB}$.
(W. Smith, "Modern Optical Engineering", McGraw Hill, 1966).

Questi calcoli permettono di stimare il valore della radianza nel range 3- 5 μm proveniente dalla superficie di 1000 cm^2 del corpo nero pari a 0.49 W nell' emisfero di 2π ster.

Per proseguire con la stima dei valori della radianza incidente sulla camera utilizzando Eqs. 1 -2, è necessaria una campagna di misure sul sito per valutare i valori reali di

- emissività ε_{bgnd} dei terreni di stoccaggio interessati,
- riflettanza R_{bgnd} dei terreni di stoccaggio interessati,
- livelli tipici di irradianza solare H in loco

N.B. Le variazioni dell'irradianza solare H in funzione della stagione, del tempo e dell'ora dovranno essere in seguito monitorate contemporaneamente alla misura principale.

3.2.2 Radiometria d'immagine

Quando la sorgente di radiazione (nel nostro caso il terreno) è proiettata sul detector da un sistema ottico, l'immagine creata possiede una propria radianza che può essere trattata come una sorgente secondaria. Un teorema fondamentale lega i valori di due radianze attraverso la trasmittanza del sistema ottico $T_{sistema}$. Quindi la radianza che arriva al CCD della camera è calcolata come

$$L^{CCD} = T_{sistema} L^{in} \quad (\text{Eq. 7})$$

Se il sistema è composto da una testa ottica e un filtro interferenziale variabile, come ad esempio nella configurazione rappresentata in Fig. 10, la radianza L^{pixel} incidente su ogni pixel del CCD è calcolabile sulla base della Eq. 1 dove i valori di radianza spettrale sono espressi da equazioni tipo Eqs. 6. Inoltre, la configurazione del sistema ottico definisce l'angolo di osservazione accessibile per ogni pixel.



Fig. 10. Esempio del sistema di proiezione dell'immagine sul CCD della camera preceduto da un filtro interferenziale variabile per la selezione spettrale.

La dimensione laterale l del pixel $l \times l$ del CCD definisce il sotto-range spettrale λ_1 - λ_2 in corrispondenza della superficie del filtro avente un gradiente $\frac{dT^{LVF}(\lambda)}{dl}$ di variazione della banda di trasmissione lungo la sua superficie l :

$$L^{\text{pixel}} = T^{\text{lens}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{l_1}^{l_2} L_{\lambda} (L_{\lambda}^{BB}, \varepsilon_{bgrd}, R_{bgrd}, C_{gas}, F, D, T^{LVF}) d\lambda dl \quad (\text{Eq. 8})$$

dove T^{lens} è la trasmittanza totale delle lenti della testa ottica della camera, F è il rapporto delle loro lunghezze focali, D è il diametro di apertura.

4 Conclusioni e sviluppi futuri

I filtri passa-banda stretto uniformi realizzati con la combinazione allumina/silicio/argento dimostrano la compatibilità dei materiali utilizzati. I filtri sono stabili nel tempo nelle condizioni di laboratorio (4 mesi). Si prevede di proseguire con i test di resistenza ambientale nelle condizioni dell'esercizio in loco.

Un ulteriore impegno è necessario per migliorare le prestazioni ottiche del filtro attraverso un controllo più affidabile del processo di deposizione dei materiali impiegati. Tali materiali non sono trasparenti nel visibile, il range spettrale dove funziona il sistema del Broadband Optical Monitoring attualmente disponibile sull'impianto per la realizzazione dei filtri.

E' stato sviluppato un modello radiometrico preliminare basato sull'analisi dei dati disponibili in letteratura e considerando la specificità della misura.

Una serie di misure dei parametri radiometrici in loco (emissività e riflettanza del suolo, irradianza solare) permetterebbe di definire i valori reali da utilizzare nel modello più realistico.

Il modello radiometrico deve essere affinato in collaborazione con lo sviluppatore della testa ottica dello strumento e sulla base delle analisi dei sensori MWIR utilizzati/utilizzabili nelle camere ultraleggere non raffreddate disponibili sul mercato. Tale modello fornirà la base non solo per la scelta della componentistica della camera off-the shelf ma anche per l'ottimizzazione del design del filtro variabile.

5 Riferimenti bibliografici

1. The European Network of Excellence on the Geological Storage of CO₂, <http://www.co2geonet.com>

2. "Testing Hyperspectral Remote Sensing Monitoring Techniques for Geological CO₂ Storage at Natural Seeps", <http://earth.esa.int/workshops/gasoil2010/Bateson.pdf>
3. A. Piegari, A. Sytchkova, A. Della Patria, F. Fermi, C. Oleari "Small-dimension portable instrument for in-situ multispectral imaging", Proc. SPIE 8084, O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology III, 80840O (June 06, 2011); doi:10.1117/12.888123
4. A. Piegari, A. Sytchkova, J. Bulir, M. Dami, G. Aroldi, B. Harnisch, "Compact imaging spectrometer with visible-infrared variable filters for Earth and planet observation", Proc. SPIE 8172, Optical Complex Systems: OCS11, 81721B (September 30, 2011); doi:10.1117/12.897433, ISBN: 9780819487988
5. L.S. Rothman et al., "The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database," J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 110, 533–572 (2009)
6. C.I. Honniball et al., "The Miniaturized Infrared Detector of Atmospheric Species (MIDAS) a low-mass, MWIR low-power hyperspectral imager", Proc. of SPIE Vol. 9819 (2016) 98190J-1
7. W. Smith, "Modern Optical Engineering", McGraw Hill, 1966
8. J.A. Sobrino et al., "Soil emissivity and reflectance spectra measurements ", Appl. Opt. 48 (2009), 3664
9. M.A. Rodríguez-Conejo and J. Meléndez, "Hyperspectral quantitative imaging of gassources in the mid-infrared", Appl. Opt. 54 (2015), 142

6 Abbreviazioni ed acronimi

CCS	Carbon Capture Storage
ENEA	Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development
FIR	Far Infrared
HSI	Hyperspectral Imaging
MIR	Medium Infrared
MSI	Multispectral Imaging