



Ricerca di Sistema elettrico

Definizione di uno schema prototipale di
un sistema spettroscopico per il
monitoraggio real time delle zone di
stoccaggio CO₂ per il rilevamento fughe,
basato su spettrometri ultraleggeri da
montare su drone

Anna Sytchkova e Angela Piegari

DEFINIZIONE DI UNO SCHEMA PROTOTIPALE DI UN SISTEMA SPETTROSCOPICO PER IL MONITORAGGIO REAL TIME DELLE ZONE DI STOCCAGGIO CO₂ PER IL RILEVAMENTO FUGHE, BASATO SU SPETTROMETRI ULTRALEGGERI DA MONTARE SU DRONE

Anna Sytchkova e Angela Piegari (ENEA)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto B.2: Polo Tecnologico del Sulcis: Tecnologie e Metodologie 'Low Carbon' e Edifici ad energia quasi zero(nZEB)

Parte A1: Tecnologie per impiantistica energetica 'Low carbon'

B-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 PASSA-BANDA STRETTO NEL MWIR	8
3.1.1	<i>I filtri passa-banda stretto nel MWIR: scelta di un design alternativo e caratterizzazione dei materiali alternativi</i>	8
3.1.2	<i>I filtri passa-banda stretto nel MWIR: multistrati uniformi e test ottici e meccanici</i>	9
3.1.3	<i>Sistema delle maschere per realizzazione dei filtri variabili nel MWIR; prototipo del MWIR-LVF</i>	11
3.2	MODELLO RADIOMETRICO.....	12
3.2.1	<i>Modello radiometrico: studio teorico</i>	12
3.2.1.1	Radiazione del corpo nero	17
3.2.1.2	Radiometria d'immagine	18
3.2.2	<i>Sviluppo del software</i>	19
3.2.2.1	Funzionalità	19
3.2.2.2	Parametri di ingresso	19
3.3	RISULTATI DELL'ELABORAZIONE	22
3.3.1	<i>Calcolo Monte Carlo</i>	23
3.3.1.1	Calcolo radiometrico base	24
3.3.1.2	Segnale differenziale.....	24
3.3.1.3	Analisi Monte Carlo	25
3.4	RISULTATI DEL CALCOLO.....	29
3.4.1	<i>Rumore del sistema</i>	29
3.4.1.1	Effetto di NETD	29
3.4.1.2	Variazione della concentrazione rilevabile	30
3.4.2	<i>Effetto delle fluttuazioni</i>	31
3.4.2.1	Fluttuazioni e apertura del sistema	31
3.4.2.2	Fluttuazione dello spessore del gas	32
3.5	CONFIGURAZIONE DEL SISTEMA DI MISURA IPERSPETTRALE	32
3.5.1	<i>Camera</i>	32
3.5.2	<i>Control PC and PCI Acquisition Board</i>	34
3.5.3	<i>Lente</i>	36
3.5.4	<i>Prestazioni</i>	37
4	CONCLUSIONI.....	40
5	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	41
6	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	41

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 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: la leggerezza della camera, il range spettrale di acquisizione ampio 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 terzo anno di attività lo studio si è concentrato su tre filoni principali

- l'attività sperimentale mirata allo sviluppo dei filtri interferenziali variabili nel MWIR
- lo sviluppo del modello di calcolo del budget radiometrico quindi del codice numerico
- l'applicazione di questi ultimi per analisi di configurazione del sistema

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 di stoccaggio dell'anidride carbonica (CO₂) è ormai una pratica diffusa nei paesi tecnicamente avanzati e 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> [1]). 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 dei siti di stoccaggio 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 da 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> [2]). 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 di salvaguardia dei beni culturali. Sulla base di questa esperienza [ad es. 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 sugli 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.

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 filtri ottici metallo-dielettrici al fine di individuare eventuali problematiche di tipo opto-meccanico. 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 il processo di sputtering. E' stato inoltre costruito un modello radiometrico preliminare della misura di rilevamento remoto da UAV, con il sistema prototipato nel primo anno e considerando le caratteristiche del luogo di applicazione.

Nella terza annualità si è lavorato su un design alternativo del filtro interferenziale, eliminando la presenza del metallo nel filtro e quindi utilizzando solo materiali dielettrici che sono più resistenti a condizioni d'uso critiche quali ad esempio l'umidità. Il modello radiometrico preliminare, sviluppato nel secondo anno, ha permesso individuare componenti disponibili in commercio (COTS, components off-the-self) per il sistema, quali ad esempio il detector ed elettronica di bordo. Si è proseguito quindi con l'upgrade del design dello strumento e del modello radiometrico della misura di rilevamento remoto da UAV. Tale studio avviato dall'ENEA nel secondo anno è stato sviluppato nella terza annualità in collaborazione con la PMI EIE Group srl già coinvolta nel progetto.

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

Tabella 1. Obiettivi posti nella terza annualità e i risultati raggiunti

Obiettivi posti	Risultati raggiunti
<p>L'ottimizzazione dei parametri del processo di deposizione (sputtering a radio frequenza) e del design ottico. Sarà necessario monitorare la stabilità dei materiali e delle loro proprietà ottiche a seguito dell'esposizione alle condizioni dell'utilizzo del filtro.</p>	<p>E' stata condotta una serie di esperimenti di realizzazione dei campioni di materiali scelti (silicio, e ossido di silicio) variando i parametri del processo. Ciò ha portato alla definizione delle condizioni ottimali per garantire le necessarie caratteristiche opto-meccaniche dei coatings.</p> <p>E' stato scelto un design alternativo che permette il wedging di un unico strato facilitando la realizzazione del filtro. Alcuni multistrati e un filtro uniforme passa-banda stretto nel MWIR (medio infrarosso), con il design tutto-dielettrico alternativo, sono stati realizzati ai fini delle prove meccaniche.</p> <p>Il filtro Fabry-Perot tarato sulla banda di assorbimento della CO₂ nel MWIR è stato caratterizzato per la 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 finale uniforme. L'aspetto visivo conservato e lo spettro di trasmittanza invariato in 5 mesi confermano la stabilità del filtro nelle condizioni del laboratorio e a seguito dell'esposizione all'ambiente esterno anche in condizioni di umidità elevata.</p>
<p>Si mira a passare dai filtri uniformi realizzati nel secondo anno ai primi prototipi dei filtri variabili.</p>	<p>E' stato realizzato un sistema di maschere per la fabbricazione dei filtri variabili nel MWIR. E' stato realizzato il primo prototipo del filtro variabile Fabry-Perot nel MWIR.</p>
<p>Analisi del budget radiometrico. Si definisce così il design preliminare della camera iperspettrale che includerà sia la testa ottica basata sui filtri sviluppati sia i componenti elettronici.</p>	<p>E' stato sviluppato il codice numerico utilizzando Open Source SciLab. Il codice permette la stima del budget radiometrico al variare delle condizioni di acquisizione del segnale e al variare dei parametri del sistema ottico impiegato. Inoltre è in corso l'analisi dei componenti ottici ed elettronici disponibili sul mercato per completare la lista di componenti off-the-shelf necessari per la realizzazione di una camera iperspettrale.</p>

3.1 I filtri passa-banda stretto nel MWIR

3.1.1 I filtri passa-banda stretto nel MWIR: scelta di un design alternativo e caratterizzazione dei materiali alternativi

Nel terzo 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. Sulla base dell'analisi dei risultati ottenuti nel secondo anno sui filtri metallo-dielettrici, si è preferito passare a un design alternativo di tipo tutto dielettrico. I materiali scelti sono silicio amorfo (a-Si, indice di rifrazione alto) e ossido di (SiO₂, indice di rifrazione basso).

A differenza dei filtri metallo-dielettrici di tipo Induced-transmittance, precedentemente considerati, questo design prevede l'utilizzo dei filtri passa-banda di tipo Fabry-Perot (FP) con il seguente disegno: sub/(LH)² L 2H (LH)². Qui H e L denominano gli strati di silicio e silice con spessore uguale a $n\lambda/4$ dove n è l'indice di rifrazione del materiale e λ è la lunghezza d'onda d'interesse. Lo strato centrale HH rappresenta la cosiddetta cavità del filtro. Variando la lunghezza d'onda di riferimento si ottiene la variazione spettrale delle bande di trasmissione del filtro. Per consentire l'uso di un unico design con variazione del solo spessore della cavità del filtro FP, occorrerà inoltre utilizzare un filtro di bloccaggio aggiuntivo, appositamente progettato: (0.088H) (0.4L) (0.48H) (1.78L) (0.5H) (LH)⁷ L (0.5H), da depositare sull'altro lato del substrato.

La Figura 1 riporta la trasmittanza e la riflettanza teoriche del filtro FP suddetto. La banda di trasmissione è stata centrata a 4900 nm rappresentativa per verifiche finali di stabilità meccanica del filtro, anche a lungo termine. Sono infatti importanti gli aspetti dello stress indotto al substrato dai coating molto spessi: lo spessore totale di circa 6,5 micrometri del filtro passa-banda stretto è infatti elevato.

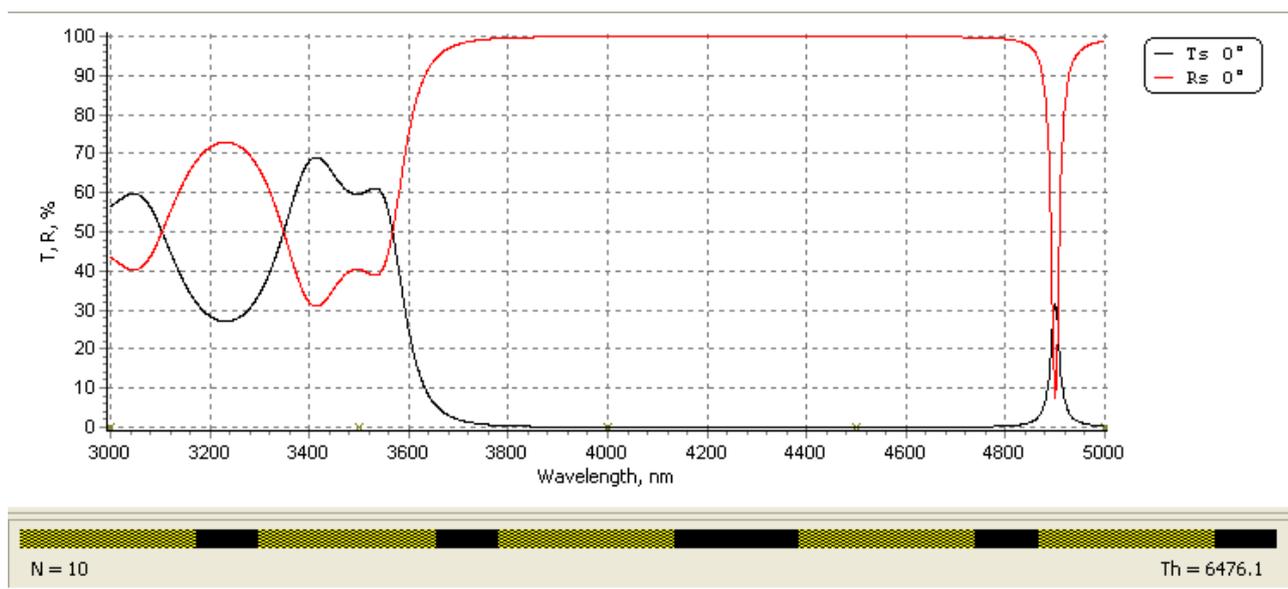


Fig. 1. Trasmittanza (curva nera) e riflettanza (curva rossa) teorica in funzione di lunghezza d'onda (in nm) del filtro interferenziale MWIR di tipo Fabry-Perot. Il picco funzionale corrisponde alla massima lunghezza d'onda del range di variazione d'interesse: 3000-4900 nm.

Si è lavorato quindi 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). Ciò ha

portato alla definizione delle condizioni ottimali per garantire le necessarie caratteristiche opto-meccaniche dei coatings. La Figura 2 riporta le proprietà ottiche dei materiali utilizzati caratterizzati con due tecniche ottiche: spettrofotometria ed ellissometria spettroscopica.

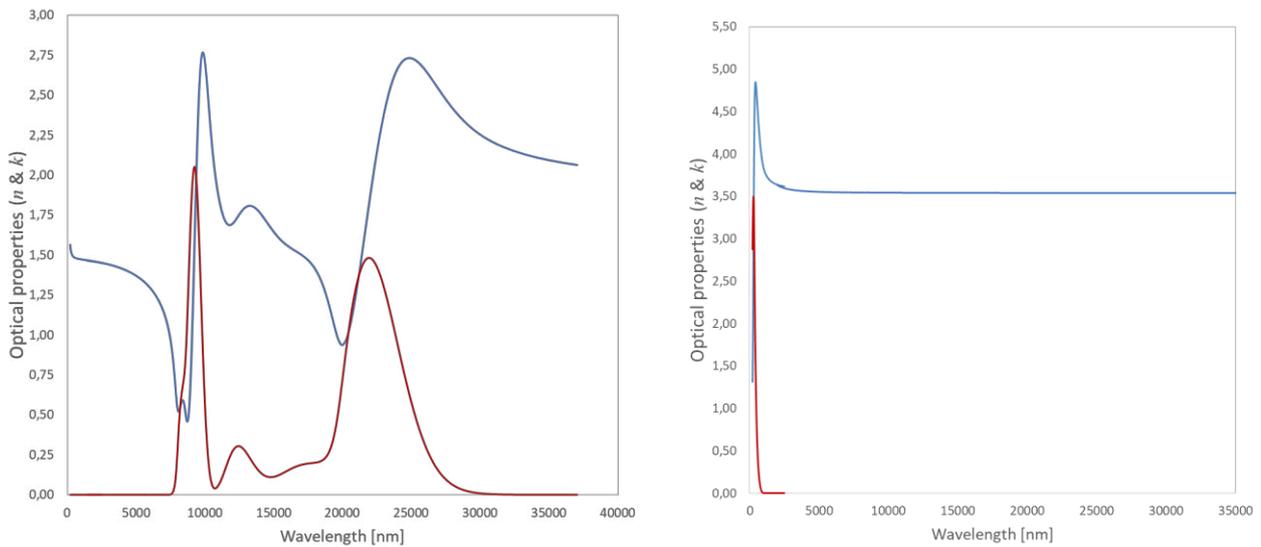


Fig.2. Indice di rifrazione (blu) e coefficiente di estinzione (rosso) di film sottile di silice (sinistra) e silicio amorfo (destra)

3.1.2 I filtri passa-banda stretto nel MWIR: multistrati uniformi e test ottici e meccanici

Successivamente è stato realizzato un filtro FP uniforme MWIR, Fig. 3. Gli spessori degli strati monitorati durante il processo di deposizione sono riportati nella Tabella 2.

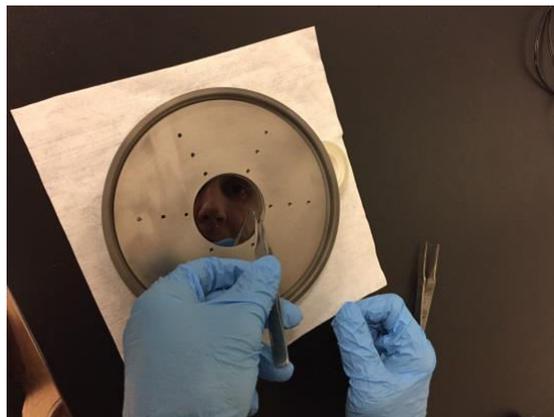


Fig.3. Filtro uniforme Fabry-Perot a $4.66 \mu\text{m}$

Tabella 2. Spessori degli strati del filtro uniforme Fabry-Perot a 4.66 μm: i dati del time-monitoring durante la deposizione

#	Layers	Thickness [nm]
10	α-Si	373
9	SiO ₂	863
8	α-Si	373
7	SiO ₂	888
6	α-Si	724
5	SiO ₂	952
4	α-Si	357
3	SiO ₂	916
2	α-Si	351
1	SiO ₂	893
-	Si substrate	300 μm
	Total thickness	6690 nm

La trasmittanza del filtro realizzato è stata misurata utilizzando uno spettrometro FT-IR commerciale, Fig.4. Il filtro è stato progettato con una sequenza di 10 strati di materiali dielettrici ed è stato realizzato con la tecnica dello r.f. sputtering. Si potrebbe dire: I valori di spessore riportati in Tabella 2 sono leggermente diversi da quelli teorici a causa degli errori di fabbricazione. La conseguenza è una riduzione della trasmittanza di picco a 4,66 μm rispetto a quella teorica, che dovrebbe essere di circa il 45%.

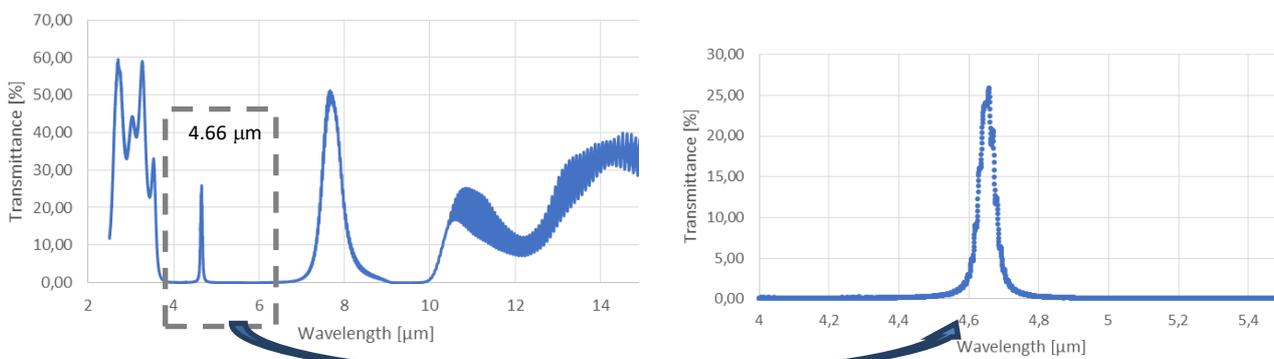


Fig. 4. Trasmittanza misurata in funzione di lunghezza d’onda (in nm) del filtro interferenziale uniforme MWIR di tipo Fabry-Perot.

I singoli strati, bistrati e il filtro a dieci strati Fabry-Perot sono stati sottoposti anche alle prove meccaniche. I test di adesione e lo scotch test effettuati confermano le buone qualità meccaniche dei materiali a singolo strato, a bistrato SiO₂/Si, e del filtro FP. I campioni sono stati monitorati sul livello dello stress man mano che cresceva il coating. I campioni finiti sono stati inoltre sottoposti alle misure di stress in temperatura, per verificare la stabilità del coating. Tabella 3 riassume i dati delle misure meccaniche dello stress.

Tabella 3. Riassunto delle misure dello stress

Sample	Si Wafer	Description	Thickness SiO ₂ , [nm]	Thickness a-Si, [nm]	Total thickness	Stress @20C, [MPa]	calculated stress @20C
Si-01	B36.01	SiO ₂	765	0	765	-380	N/A
Si-02	B36.02	SiO ₂ /a-Si	765	281	1046	-280	-259
Si-03	B36.03	10 layer FP	4512	2178	6690	-250	-233
Si-06	B36.06	a-Si	0	651	651	70	N/A

La Figura 5 illustra le misure di stress come un doppio ciclo di variazione della temperatura da 20°C a 200°C sul dispositivo Fabry-Perot finale, provando l'effetto di compensazione dello stress tra due materiali utilizzati per il coating. I dati confermano che tutti i campioni depositati con la tecnica di sputtering in condizioni scelte sono privi sia dello stress termico sia di quello igroscopico che conferma la qualità dei materiali e l'adeguatezza dei processi di deposizione utilizzati. Come riferimento la figura riporta lo stesso test effettuato su un campione a singolo strato di SiO₂ prodotto con la tecnica di evaporazione a fascio elettronico, per il quale è evidente invece il cambio dello stress.

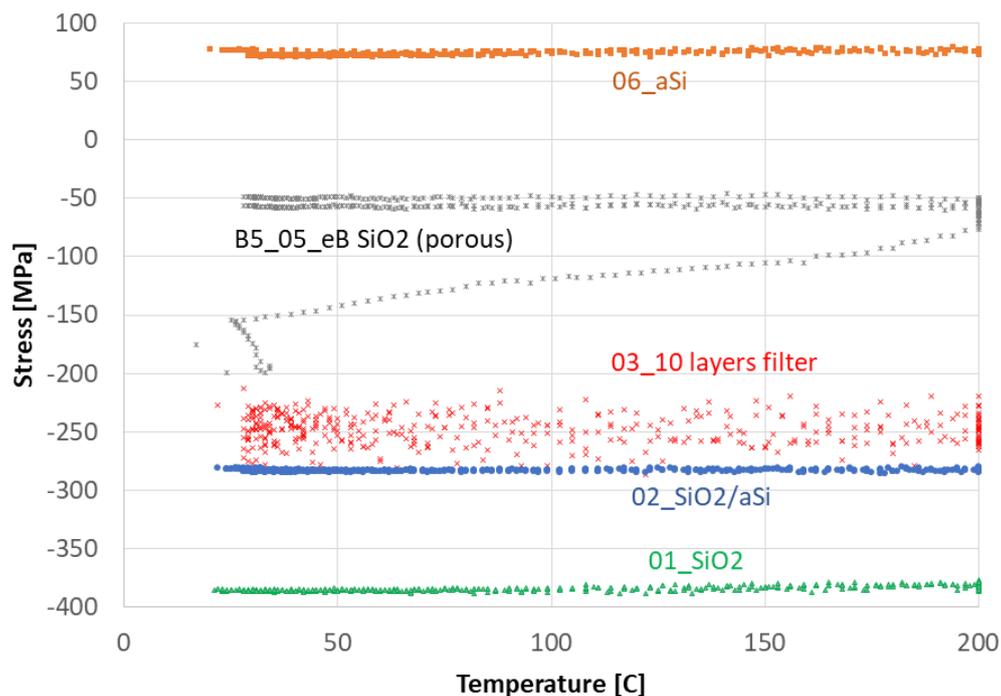


Fig. 5. Variazione dello stress termico dei campioni elencati nella Tab. 3 a confronto con un tipico campione poroso di strato singolo di silice.

L'aspetto visivo conservato e lo spettro di trasmittanza invariato in 4 mesi confermano la stabilità del filtro nelle condizioni del laboratorio e a seguito dell'esposizione all'ambiente esterno, incluse condizioni di umidità elevata.

3.1.3 Sistema delle maschere per realizzazione dei filtri variabili nel MWIR; prototipo del MWIR-LVF

Uno dei vantaggi del nuovo design del filtro variabile (LVF) tutto dielettrico consiste nel permettere di variare solo lo spessore della cavità del filtro Fabry-Perot lasciando uniformi gli altri strati del coating. Per ottenere uno strato di spessore variabile è necessario utilizzare all'interno dell'impianto di deposizione un

sistema di maschere opportuno. E' stato quindi realizzato un porta-campione specifico per la deposizione della cavità wedged del filtro, Fig.6.

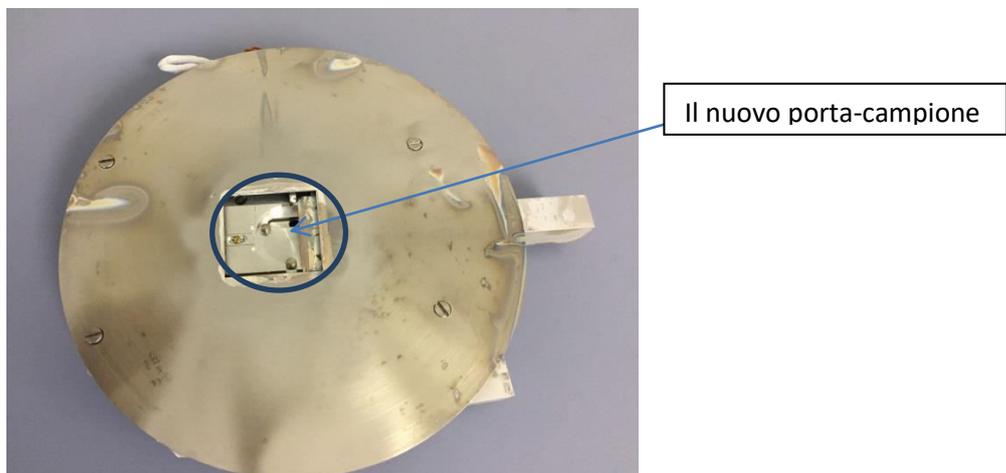


Fig. 6. Sistema di maschere per la deposizione dei filtri variabili nel MWIR.

Quindi è stato realizzato il primo prototipo del filtro variabile Fabry-Perot per il range ottico nel MWIR, Fig. 7.

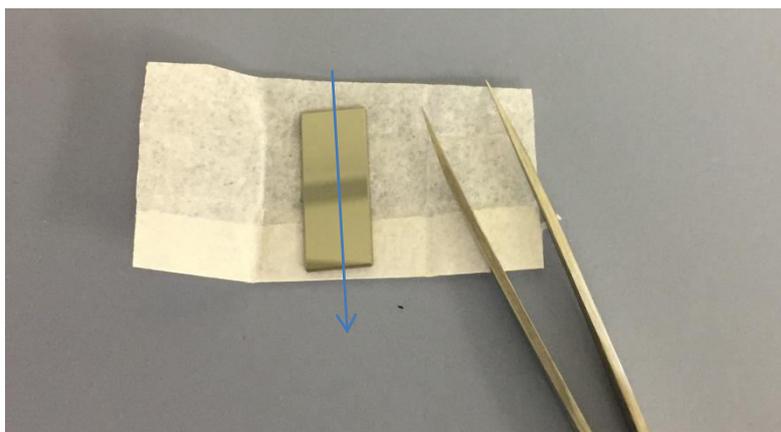


Fig. 7. Filtro variabile passa-banda stretto tutto dielettrico di tipo Fabry-Perot per un ampio range nel MWIR. Nella direzione della variazione della curva funzionale della trasmittanza (indicata con la freccia) il picco centrale cambia posizione spettrale da 3000 nm a 4900 nm.

3.2 Modello radiometrico

3.2.1 Modello radiometrico: studio teorico

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. 8, vantaggiosa in quanto meno sovrapposta con le bande di assorbimento delle altre specie gassose presenti nell'atmosfera, Fig. 9. 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)).

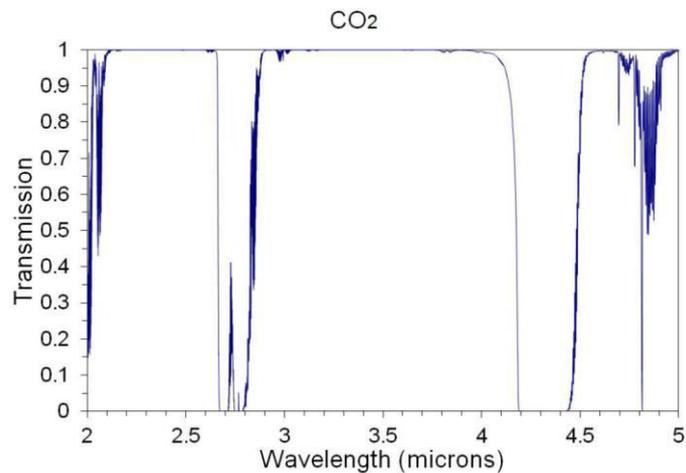


Fig. 8. Spettro (bande di assorbimento) della CO₂ nell' infrarosso vicino (NIR) e medio (MWIR)

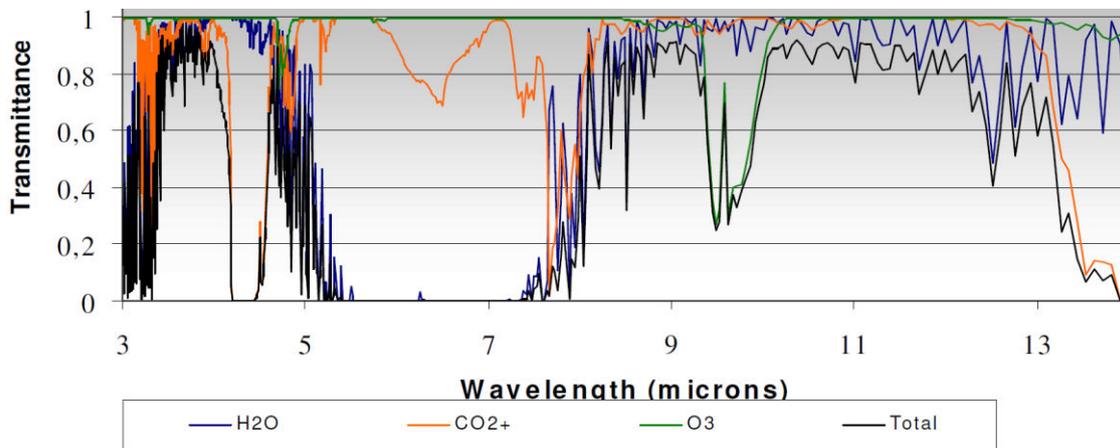


Fig. 9. Spettro della CO₂ nell' infrarosso a confronto con le principali specie gassose atmosferiche.

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. 10 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.

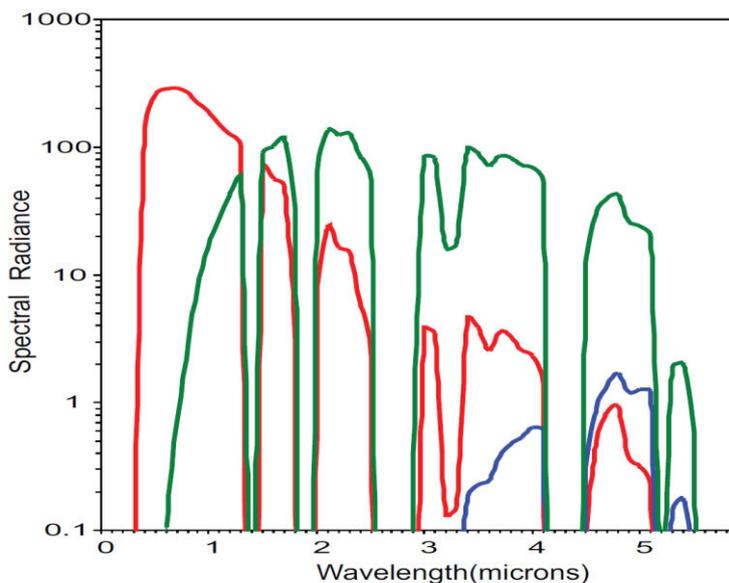


Fig. 10. Radianza spettrale (in $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) appena fuori dell’atmosfera terrestre. La curva rossa è la radiazione solare se riflessa dalla superficie terrestre al 100%. La curva blu è la radiazione proveniente da un corpo a terra che è a temperatura di 300°K. La curva verde corrisponde 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 11 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.

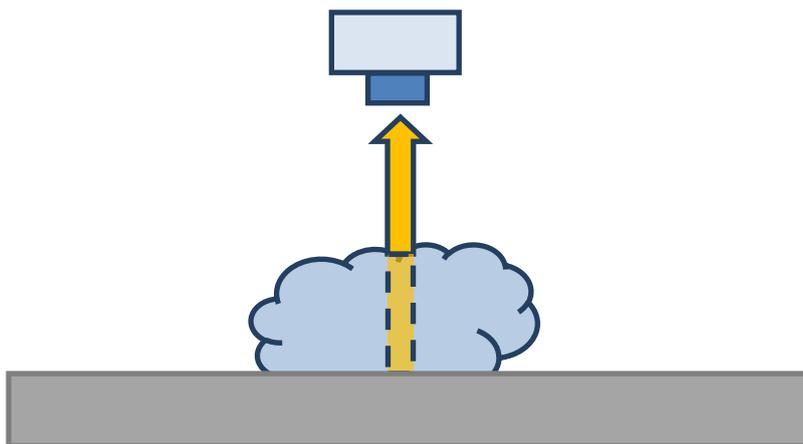


Fig. 11. Schema della misura su campo.

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

1. Essendo la CO₂ il gas più pesante tra quelli normalmente presenti nell’ atmosfera e presumendo bassi flussi dalle fessure di fuoriuscita, la nuvola della CO₂ 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 ε_{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. 12.

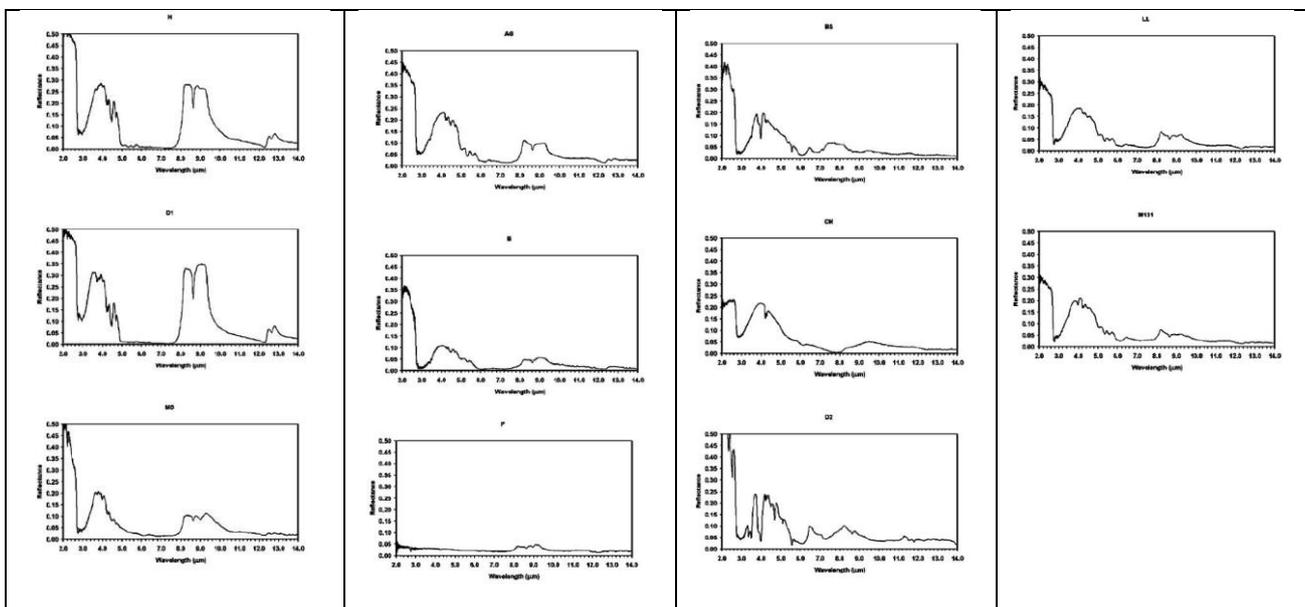


Fig. 12. Riflettanza dei suoli elencati nella Tabella 4. I grafici e la tabella sono riprodotti da José A. Sobrino et al., "Soil emissivity and reflectance spectra measurements", *Appl. Opt.* 48 (2009), 3664.

Tabella 4. Nominativi dei suoli, loro tipi e provenienza, la cui riflettanza spettrale è riportata in Fig. 12.

Projects	Time Period	Supported	Text Code	Place	Latitude	Longitude	Descriptions	USDA Soil 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 biogeophysical 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 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 near ice glaciers	<i>rock/lands 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, 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

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

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:

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

Da non trascurare il fatto che i valori della trasmittanza dei gas variano con la temperatura in modo non omogeneo. Figura 13 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.

Dalla (1) occorre ricavare la concentrazione in funzione degli altri parametri. Per l'invariante di Lagrange, la radianza si conserva, a meno di un fattore moltiplicativo (eventualmente dipendente dalla lunghezza d'onda) che rappresenta la trasmittività dell'ottica e la risposta del rivelatore.

È pertanto possibile moltiplicare l'Eq.(1) per questi fattori moltiplicativi, integrare sul campo di vista del pixel per l'area del pixel, per ottenere il flusso misurato dal rivelatore. Moltiplicando per il tempo di acquisizione, si ottiene il segnale misurato dal rivelatore per ciascun pixel.

Il rumore dipende:

- Dallo shot noise
- Dal rumore del rivelatore

Al segnale prodotto dalla sorgente di interesse si sovrappone il segnale prodotto dal fondo, che a sua volta, per una parte, contribuisce al rumore.

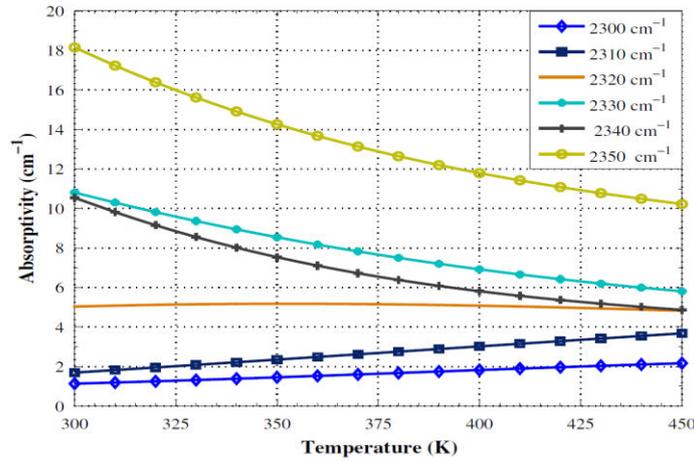


Fig. 13. Variazione dell'assorbanza della CO_2 in funzione della temperatura a diverse lunghezze d'onda. Da M.A. Rodríguez-Conejo and J. Meléndez, "Hyperspectral quantitative imaging of gas sources in the mid-infrared", *Appl. Opt.* 54 (2015), 142.

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

3.2.1.1 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. 14 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. 14 i valori corrispondenti di $L^{BB}_{\lambda} / L^{BB}_{\lambda_{max}}$ sono 0.01 e 0.25.

Moltiplicando questo rapporto 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. 14, 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 $4.9 \cdot 10^{-2} W/cm^2$.

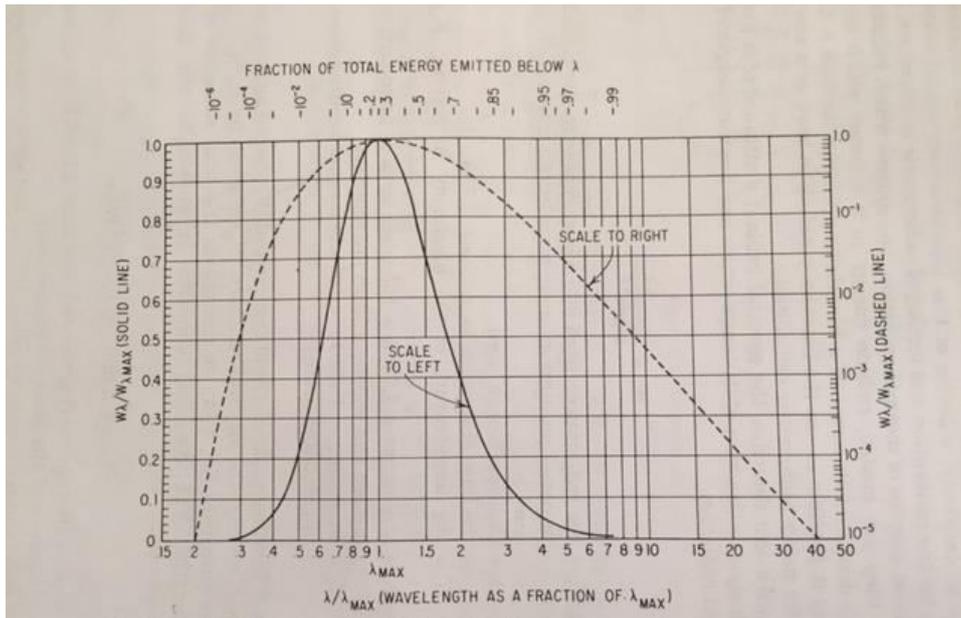


Fig. 14. Distribuzione spettrale del corpo nero. Qui $W = L^{BB}$.
(W. Smith, "Modern Optical Engineering", McGraw Hill, 1966).

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_{bgrd} dei terreni di stoccaggio interessati,
- riflettanza R_{bgrd} 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.

3.2.1.2 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

$$L^{CCD} = T_{sistema} L^{in} \tag{Eq. 7}$$

Se il sistema è composto da una testa ottica e un filtro interferenziale variabile, come ad esempio nella configurazione rappresentata in Fig. 15, 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.

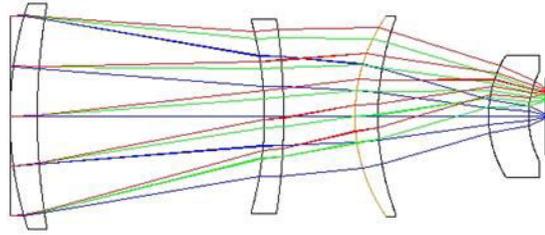


Fig. 15. Esempio del sistema di proiezione dell'immagine sul CCD della camera preceduto da un filtro interferenziale variabile per la selezione spettrale.

La dimensione laterale l del pixel $l \times l$ del CCD definisce il sotto-range spettrale $\lambda_1-\lambda_2$ 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.

3.2.2 Sviluppo del software

3.2.2.1 Funzionalità

Il software è stato sviluppato nell'ambito di un contratto di collaborazione con la ditta EIE Space Group s.r.l. e include le seguenti funzioni principali:

- Calcolo radiometrico in funzione dei parametri ambientali
- Sviluppo dell'interfaccia grafica

3.2.2.2 Parametri di ingresso

Il calcolo radiometrico considera svariati parametri, raggruppabili come da seguente tabella, Tab.5. Gli ingressi, la cui interfaccia grafica è illustrata dalla Figura 16, si suddividono in quattro gruppi principali:

- Parametri ambientali
- Parametri dello strumento di misura
- Parametri di configurazione
- Parametri della simulazione Monte Carlo

Al momento non sono previsti particolari controlli sulla correttezza dei dati inseriti: si presuppone che l'utente sia sufficientemente esperto da non inserire valori irrealistici.

Alcuni parametri sono espressi in funzione della lunghezza d'onda, in particolare:

- Profilo di trasmissività dell'atmosfera
- Profilo di riflettività del suolo
- Profilo di trasmissività della lente
- Curva di efficienza quantica

I dati possono essere caricati dal software attraverso files in formato .txt. Se l'utente non carica alcun file, il software procede con l'analisi sulla base delle seguenti assunzioni:

- Trasmissività atmosfera pari al 70% su tutto lo spettro
- Riflettività del suolo pari al 70% su tutto lo spettro
- Trasmissività della lente pari al 70% su tutto lo spettro
- Due opzioni per la curva di efficienza quantica:
 - o Valori definiti da un modello interno al codice
 - o Valori definiti da un modello che utilizza i parametri presenti nella finestra di dialogo. Per attivare questo modello occorre mettere la spunta sul comando "Use QE Model". Tale modello obbedisce alla seguente legge (a , b e λ_0 sono rispettivamente dati dai parametri *QE Amp*, *QE Offset*, *QE C. Wave*):

$$QE = -a \cdot (\lambda - \lambda_0)^2 + b$$

Radiometric Model

Inputs				Files
Min. Wave [um]	0.4	Fitting Poly Deg.	1	Air Transmittance
Max. Wave [um]	10	CO2 Variation [%]	25	Soil Reflectance
N. Points	200	MC Steps	500	Lens Transmittance
Int. time [s]	0.1	% Gas Thick	5	QE Data
Lens F/#	2	% Atm. Transm.	5	
CO2 Temp. [K]	300	% Soil. R.	5	
Air Temp. [K]	300	% Sol. Const.	1	Simulate
Soil Temp. [K]	300	% Temp. Soil	1	Clear
Layer Thic [m]	10	% Temp. Gas	1	Close
Pix Size [um]	50	% Soil Em.	1	
Solar Const [W/m2]	800	Steps of Integratio	20	
Soil Emissivity	0.5			
Detector NETD [K]	0.2			
Gas Conc. [mol/m3]	0.02			
Lens Diameter [m]	0.01			
QE C. Wave [um]	4			
QE Offset	20			
QE Amp	2			
Use QE Model	<input type="checkbox"/>			




Fig. 16 Finestra per l'inserimento dei parametri della simulazione.

Tabella 5 Elenco dei parametri definiti dall'utente.

PARAMETRI DELLA SIMULAZIONE	
Parametri Ambientali	
Temperatura dello strato di CO2	
Temperatura dell'aria	
Temperatura del suolo	
Spessore dello strato di CO2	
Emissività del suolo	In funzione della lunghezza d'onda
Concentrazione CO2	
Costante solare	
Trasmissività dell'aria	In funzione della lunghezza d'onda
Riflettività del suolo	In funzione della lunghezza d'onda
Parametri Strumento	
Apertura numerica della lente	
Dimensione del pixel	
NETD del rivelatore	
Diametro della lente	
Trasmissività della lente	In funzione della lunghezza d'onda
Curva di efficienza quantica	
Parametri di Configurazione	
Intervallo di lunghezze d'onda	
Campionamento dell'intervallo di lunghezze d'onda	
Tempo di integrazione	
Parametri della simulazione Monte Carlo	
Grado del polinomio usato per il fit dei dati simulati	
Variazione percentuale della concentrazione di CO2 simulata rispetto al valore nominale	
Numero di generazioni random	
Variazione percentuale dello spessore dello strato di CO2	
Variazione percentuale della trasmissività atmosferica	
Variazione percentuale della riflettività del suolo	
Variazione percentuale della costante solare	
Variazione percentuale della temperatura del suolo	
Variazione percentuale della temperatura dello strato di CO2	
Variazione percentuale dell'emissività del suolo.	

3.3 Risultati dell'elaborazione

La Figura 17 mostra i principali blocchi del codice numerico. L'architettura è incentrata attorno ad un nucleo di calcolo principale che, sulla base dei parametri di ingresso inseriti dall'utente, calcola gli elementi per le successive elaborazioni. Attualmente, il software esegue tre diversi tipi di calcolo:

1. Calcolo radiometrico del segnale e del rumore in funzione della lunghezza d'onda per dati parametri di ingresso.

2. Calcolo della variazione del segnale ipotizzando una certa variazione percentuale della concentrazione di CO2

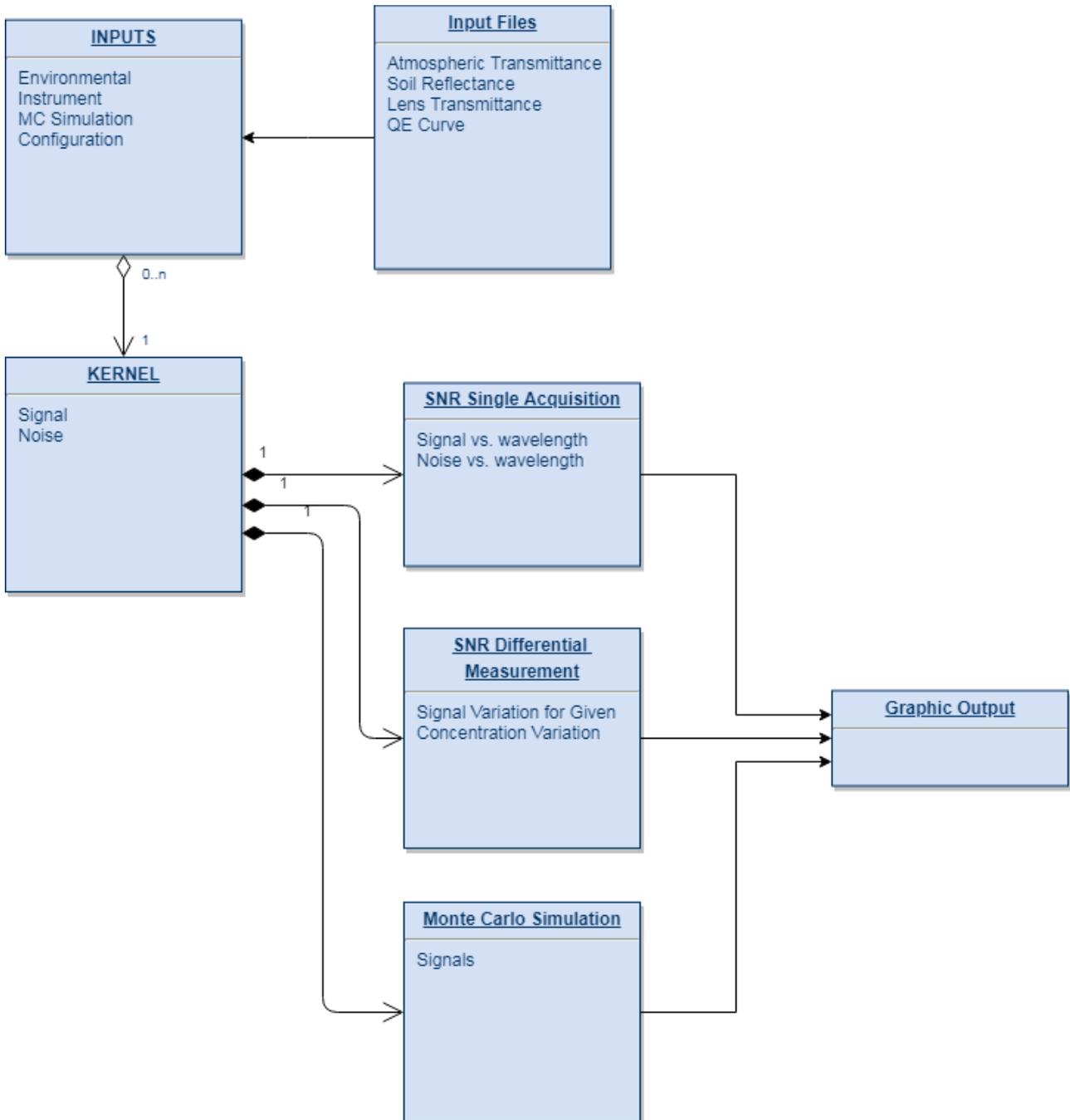


Fig. 17. Schema a blocchi del SW.

3.3.1 Calcolo Monte Carlo.

Nel seguito si descrivono con maggiore dettaglio i tre calcoli eseguiti. Si sottolinea che successive release del software possono consentire, se richiesto, livelli di elaborazione via via più sofisticate, in funzione del livello di complessità richiesto. I *building block* principali del software di simulazione sono infatti definiti e possono essere impiegati in maniera flessibile per altri tipi di analisi.

3.3.1.1 Calcolo radiometrico base

Il calcolo radiometrico del segnale raccolto dalla lente utilizza il modello sviluppato in § 3.2.1. In particolare si ipotizza che lo strato di CO₂ che fuoriesce dal suolo sia posto vicino al suolo. Non è necessario conoscere la distanza dello strato di gas dal sensore per calcolare il segnale, per conservazione della radianza e poiché la sorgente è estesa.

In particolare, il segnale si compone di due termini, che dipendono dalla componente di radiazione solare riflessa dal suolo nella banda dello spettro di interesse ($S_{reflected}$) e la componente di radiazione emessa per emissione di corpo grigio dal suolo posto ad una certa temperatura ($S_{emitted}$):

$$S = S_{reflected} + S_{emitted}$$

L'esistenza di uno strato di CO₂ in prossimità del suolo si manifesta come un termine di assorbimento che influisce su entrambi questi termini.

Il rumore associato alla misura è stato simulato come somma di due contributi. Il primo contributo è lo *shot noise* dovuto alla radianza del segnale incidente. Questo termine è intrinseco al processo ed è dato dalla seguente equazione:

$$N_{shot} = \sqrt{S}$$

Questo calcolo viene eseguito dopo aver convertito la radianza incidente nella distribuzione spettrale del numero di foto-elettroni rilevati. In questo calcolo rientrano pertanto anche alcune caratteristiche dello strumento, quali ad esempio l'efficienza quantica e il tempo di integrazione. Questo procedimento consente di mantenere coerenza di unità di misura.

Il secondo termine è dovuto al rivelatore e all'elettronica ad esso associata. Per simulare questo secondo termine occorre riferirsi ai valori resi disponibili dai produttori. Uno dei parametri più impiegati per indicare la risoluzione in temperatura è rappresentato dal *Noise Equivalent Temperature Difference* (NETD). Questo parametro è definito come quella differenza di temperatura tra l'oggetto misurato e il fondo, che produce un segnale equivalente al rumore. Esso indica la più piccola differenza di temperatura che può essere misurata dal dispositivo.

L'algoritmo impiegato calcola la componente di rumore dovuto al sistema di rilevazione utilizzando la seguente formula:

$$N_{detector} = G(T_{soil} + NETD) - G(T_{soil})$$

In questa equazione $G(T)$ è la radianza di corpo grigio del suolo alla temperatura T . Per coerenza di unità di misura, anche questo termine è convertito in una distribuzione spettrale del numero di fotoni rilevati. Il rumore totale si può ottenere come somma aritmetica dei due termini di errore:

$$N_{tot} = N_{shot} + N_{detector}$$

3.3.1.2 Segnale differenziale

Lo scopo del sistema consiste nel rilevare fughe di CO₂ dai depositi di contenimento localizzati nel sottosuolo. Una tale perdita si manifesterebbe come un aumento di concentrazione del gas in uno strato localizzato vicino al livello del suolo. L'aumento di concentrazione comporta una variazione del segnale S .

Esprimendo quanto sopra in termini matematici, indicando con C_{CO_2} la concentrazione di diossido di carbonio, la misura è data da:

$$m = \frac{\partial S}{\partial C_{CO_2}}$$

Il software permette pertanto di analizzare anche questa condizione, simulando la variazione del segnale con la concentrazione del gas. In particolare, si calcola la seguente quantità:

$$SNR_d = \frac{S_2 - S_1}{\sqrt{N_1^2 + N_2^2}}$$

In questa equazione S_1 ed S_2 sono rispettivamente il segnale a concentrazione nominale (inserita dall'utente) ed il segnale ottenuto ipotizzando un aumento della concentrazione nominale pari ad una percentuale ε (definita anch'essa dall'utente). I parametri N_1 ed N_2 sono i rumori associati ai due segnali. Tutte queste grandezze sono funzioni della lunghezza d'onda. Il rispettivo grafico mostra l'andamento del rapporto segnale rumore e può essere impiegato per studiare le bande dello spettro ove eseguire le misure.

3.3.1.3 Analisi Monte Carlo

Una variazione del segnale può dipendere anche da una variazione di altri parametri, ad esempio la variazione di temperatura del suolo. La firma spettrale di queste variazioni tuttavia sarà differente, in quanto la variazione della concentrazione di CO₂ influisce su precise bande dello spettro, mentre altri parametri variabili (come la temperatura, ma non per esempio il profilo di trasmissività delle lenti), influenzano lo spettro in maniera differente.

Il software esegue un'analisi Monte Carlo per analizzare come questi fattori ambientali possano influenzare la capacità del sistema di misurare la variazione della concentrazione di CO₂. Ogni parametro ambientale è trattato come una variabile aleatoria avente media pari al valore impostato dall'utente e un intervallo di variabilità anch'esso impostato dall'utente. Entro tale intervallo la distribuzione di probabilità è uniforme. Il rumore associato alla misura, calcolato come indicato in §3.3.1.1, è utilizzato per generare un rumore gaussiano avente media nulla e deviazione standard pari a N_{tot} . Questa componente di errore si somma al rumore di fondo ambientale generato dalla variabilità dei parametri.

Per evidenziare il solo rumore della misura è sufficiente impostare il valore dell'intervallo di variabilità di ciascun parametro a zero.

Per evidenziare come la firma spettrale delle varie componenti che contribuiscono alla variazione del segnale possano influenzare la misura, nel corso della simulazione MC si prendono come riferimento tre valori:

- Integrale del segnale entro la banda spettrale compresa tra 2460nm e 2840nm
- Integrale del segnale entro la banda spettrale compresa tra 4100nm e 4330nm
- Integrale del segnale entro la banda spettrale compresa tra 900nm e 1100nm

Le prime due bande corrispondono a righe di assorbimento del diossido di carbonio, mentre l'ultima regione non include righe di assorbimento della CO₂. Una variazione della concentrazione di gas CO₂ dovrebbe influenzare i segnali delle prime due regioni, mentre dovrebbe lasciare relativamente invariato il segnale della terza regione. Viceversa, la temperatura modifica il segnale rilevato in tutte le bande dello spettro, sebbene in proporzioni diverse. Confrontando l'andamento dei segnali dovrebbe essere possibile distinguere un cambiamento dovuto alla variazione della concentrazione di CO₂ da altri segnali spuri.

Per verificare questo la simulazione aggiunge, alle variazioni casuali discusse precedentemente, un aumento quadratico della concentrazione di CO₂ dal valore nominale fino alla massima variazione percentuale impostata dall'utente.

Per ogni generazione random, si calcolano i segnali s_1 , s_2 ed s_3 , generando così tre serie di dati. Si prendono poi le serie di dati così generate, si media ciascuna a zero e si calcolano i coefficienti del polinomio che meglio interpola i dati. Il grado del polinomio è impostabile dall'utente:

$$\begin{aligned}
 s_1(k) &= \int_{2460}^{2840} S_k(\lambda) d\lambda \\
 s_2(k) &= \int_{3270}^{4030} S_k(\lambda) d\lambda \\
 s_3(k) &= \int_{900}^{1100} S_k(\lambda) d\lambda \\
 \hat{s}_1(k) &= s_1(k) - \bar{s}_1 \\
 \hat{s}_2(k) &= s_2(k) - \bar{s}_2 \\
 \hat{s}_3(k) &= s_3(k) - \bar{s}_3 \\
 f_1(k) &= \wp_d[\hat{s}_1(k)] \\
 f_2(k) &= \wp_d[\hat{s}_2(k)] \\
 f_3(k) &= \wp_d[\hat{s}_3(k)]
 \end{aligned}$$

Per poter valutare l'errore sul fit polinomiale si calcolano i residui:

$$\begin{aligned}
 \hat{r}_1(k) &= \wp_d[\hat{s}_1(k)] - \hat{s}_1(k) \\
 \hat{r}_2(k) &= \wp_d[\hat{s}_2(k)] - \hat{s}_2(k) \\
 \hat{r}_3(k) &= \wp_d[\hat{s}_3(k)] - \hat{s}_3(k)
 \end{aligned}$$

Il calcolo dell'intervallo di confidenza del modello è eseguito solo per il caso di regressione lineare. Per calcolare l'intervallo di confidenza del modello nel caso più generale di regressione polinomiale occorre considerare la matrice di correlazione dei coefficienti del fit.

Nel caso di regressione lineare si hanno due termini, ovvero il coefficiente angolare ed il valore dell'intercetta all'origine.

Per questi due parametri l'intervallo di confidenza è calcolato secondo le seguenti formule, per il coefficiente angolare e l'ordinata all'origine rispettivamente:

$$\begin{aligned}
 u_1^2 &= \frac{SSE^2}{\sum_i t_i^2 - n\bar{t}^2} \\
 u_2^2 &= \frac{SSE^2}{n}
 \end{aligned}$$

Dati questi valori si calcolano quindi le rette che delimitano l'intervallo di confidenza del 99.7%.

I risultati del calcolo possono essere impiegati per verificare se il sistema sia in grado di misurare con un certo grado di confidenza la variazione della concentrazione di anidride carbonica; Figura 18 mostra una tipica schermata con i risultati dell'analisi.

Allo stato attuale, il software calcola il coefficiente di correlazione per la regressione lineare; attraverso questo parametro è possibile stabilire quanta parte della variabilità della variabile dipendente possa essere spiegata attraverso la retta di regressione.

Il coefficiente di correlazione sarà il parametro che verrà utilizzato per illustrare nei paragrafi successivi le prestazioni di varie configurazioni, al fine di identificare la configurazione più adeguata per l'esecuzione delle misure.

La definizione del valore di soglia sul coefficiente di correlazione, in base al quale stabilire se la misura è affidabile, dipende da una serie di considerazioni specifiche, che dipendono da un'analisi estesa dei dati. Qui citiamo a titolo di esempio l'analisi di sensibilità condotta sul parametro che definisce lo spessore dello strato di CO₂, una delle variabili sulle quali si ritiene vi siano ampi margini di incertezza.

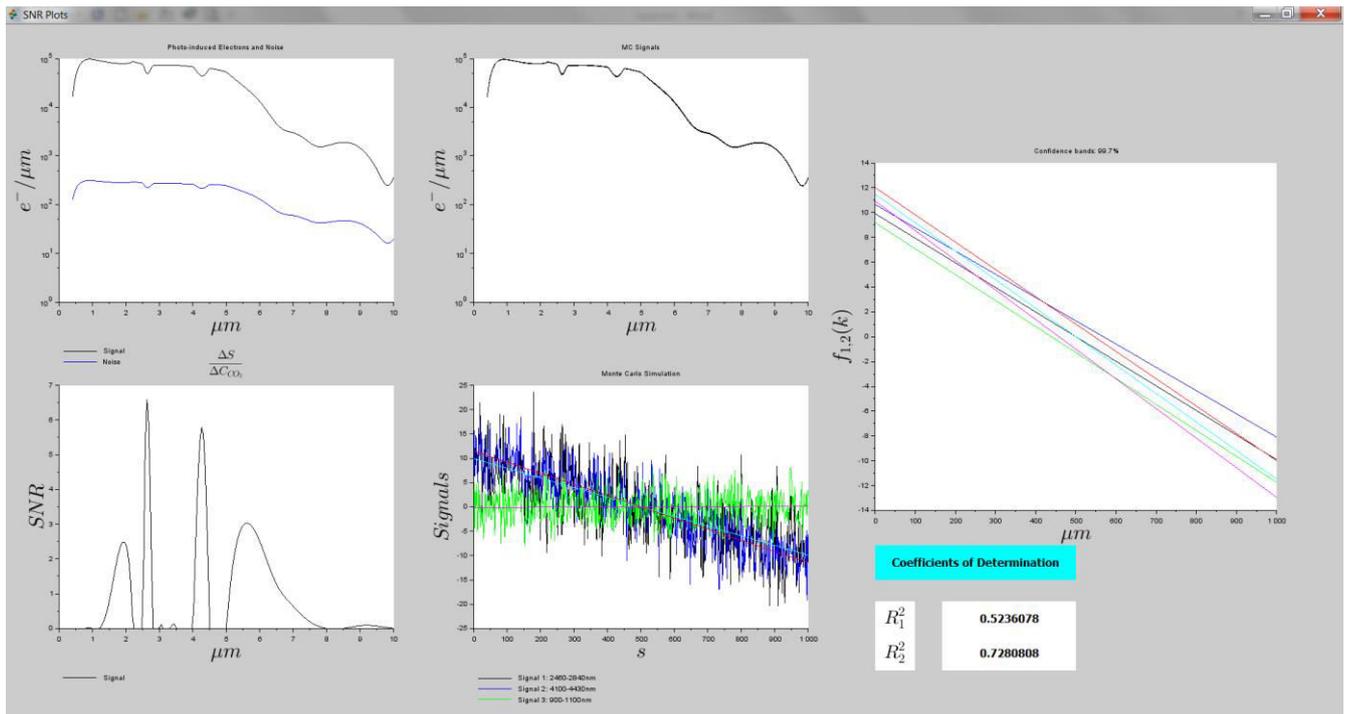


Fig. 18 Tipica schermata con i risultati delle simulazioni.

La Tabella 6 riporta i risultati dell'analisi di sensibilità condotta sullo spessore dello strato di CO₂ (h_{CO_2}); la Figura 19 illustra i valori degli altri parametri, mentre la Figura 20 mostra il risultato in forma grafica.

In assenza di qualsiasi altra fluttuazione, minimizzando il rumore della telecamera (NETD = 0.1 °K), il solo shot noise è tale per cui la correlazione dei dati ottenuti non è mai superiore a 80%. Tale soglia diminuisce all'aumentare delle fluttuazioni di h_{CO_2} . Questa analisi indica che se le fluttuazioni fossero dell'ordine del 15% rispetto al valore nominale, non ci si potrebbe aspettare una statistica migliore del 63%; se le fluttuazioni sono nulle, non ci si può attendere una statistica migliore dell'80%.

Tabella 6 Analisi di sensibilità sullo spessore dello strato di CO₂.

$\Delta h_{CO_2}/h_{CO_2}$	R^2			\bar{R}^2	σ_{R^2}	$\bar{R}^2/80$	$\sigma_{R^2}/80$	Fit
0%	80	80	79	80	1	1,00	0,01	100%
5%	76	75	77	76	1	0,95	0,01	96%
10%	63	68	64	65	3	0,82	0,03	83%
15%	49	49	53	50	2	0,63	0,03	61%

Radiometric Model

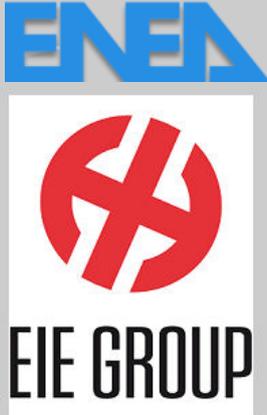
Inputs				Files
Min. Wave [um]	0.4	Fitting Poly Deg.	1	Air Transmittance
Max. Wave [um]	10	CO2 Variation [%]	10	Soil Reflectance
N. Points	200	MC Steps	500	Lens Transmittance
Int. time [s]	0.1	% Gas Thick	15	QE Data
Lens F/#	2	% Atm. Transm.	0	
CO2 Temp. [K]	300	% Soil. R.	0	
Air Temp. [K]	300	% Sol. Const.	0	Simulate
Soil Temp. [K]	300	% Temp. Soil	0	Clear
Layer Thic [m]	10	% Temp. Gas	0	Close
Pix Size [um]	50	% Soil Em.	0	
Solar Const [W/m2]	800	Steps of Integratio	20	
Soil Emissivity	0.5			
Detector NETD [K]	0.1			
Gas Conc. [mol/m3]	0.02			
Lens Diameter [m]	0.05			
QE C. Wave [um]	4			
QE Offset	20			
QE Amp	2			
Use QE Model	<input type="checkbox"/>			

Fig. 19 Altri valori dei parametri impiegati per l'analisi di sensibilità.

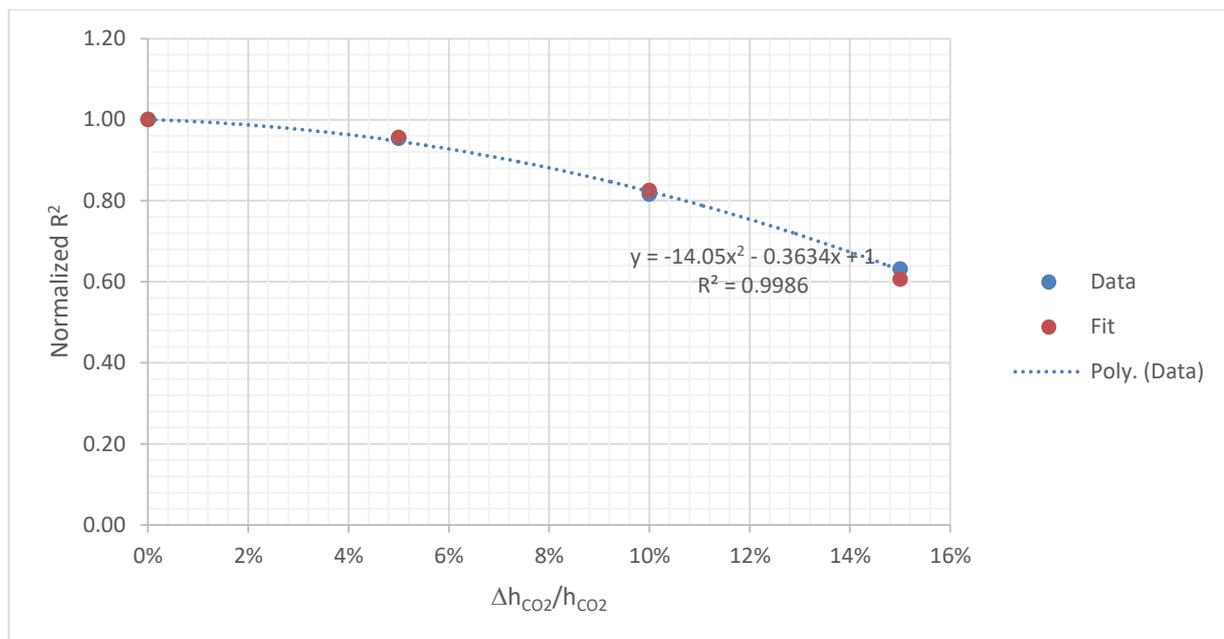


Fig. 20 Analisi di sensibilità sullo spessore dello strato di CO₂, fit polinomiale e quadratico

Questi risultati dipendono anche dalla soglia di rilevabilità impostata per la variazione della concentrazione di CO₂, qui pari a 10%; in altri termini, si sta studiando il sistema dal punto di vista della sua capacità di rilevare una variazione della concentrazione pari al 10% rispetto alla concentrazione nominale, posta pari a 0.02 mol/m³.

3.4 Risultati del calcolo

Il programma di calcolo è stato utilizzato per proseguire nell'analisi della configurazione del sistema, analizzando la capacità del sistema di rilevare variazioni di concentrazione in funzione di vari parametri di sistema e ambientali.

3.4.1 Rumore del sistema

3.4.1.1 Effetto di NETD

La Figura 21 mostra l'andamento del coefficiente di correlazione in funzione del rumore del sensore. L'analisi si riferisce a una lente avente un diametro di 50 mm e una soglia di rilevazione per la variazione di C_{CO_2} pari al 5% del valore nominale, fissato a 0.02 mol/m³. Da notare che in queste condizioni il segnale è *shot-noise limited*: la Figura 22 mostra come l'aumento del diametro della lente fino a 500 mm aumenti il rapporto segnale rumore fino a un punto tale da ottenere un coefficiente di correlazione pari circa al 99%.

I risultati di Figura 21 portano pertanto a concludere che per una lente di 50 mm di diametro il rumore dovuto al rivelatore non influisce significativamente sulla misura. Ricordiamo inoltre che per un rivelatore microbolometrico non raffreddato il valore tipico per NETD è dell'ordine di 0.04-0.05 K.

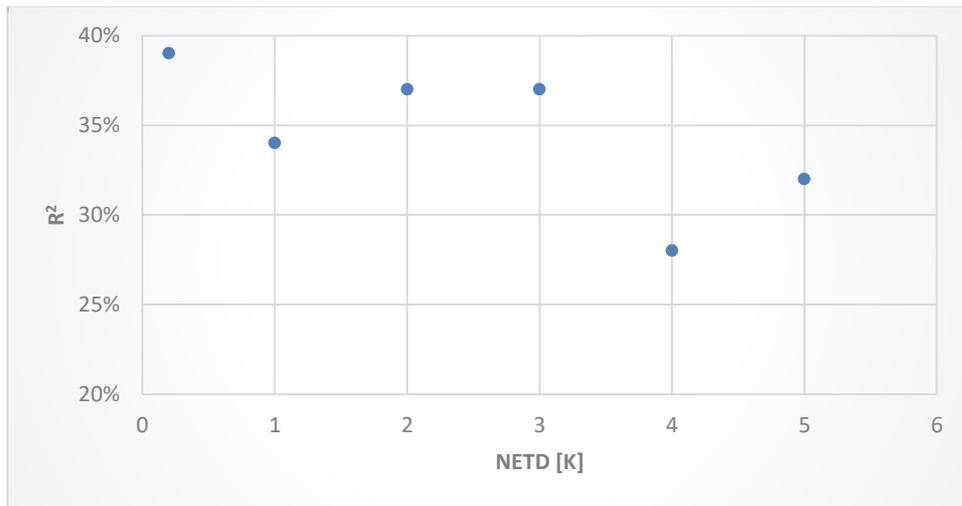


Fig. 21 Variazione del coefficiente di correlazione

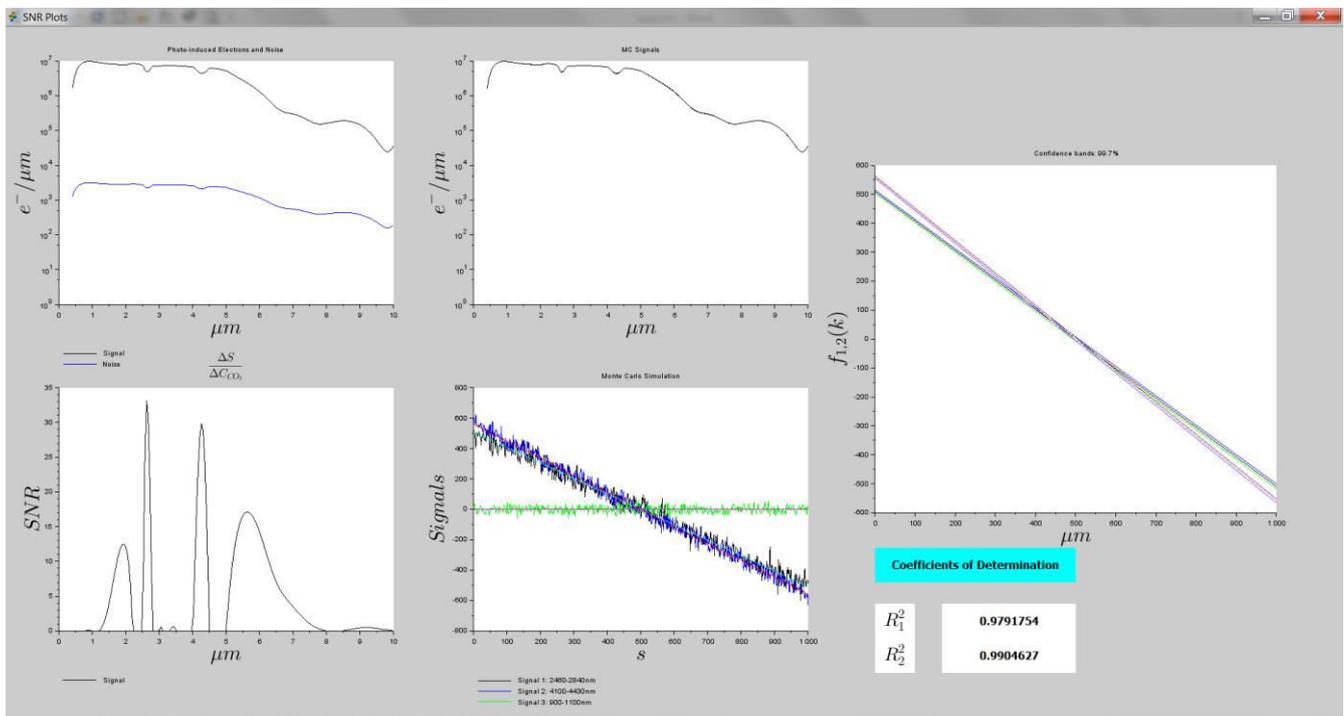


Fig. 22 Analisi su soglia rilevabilità del 5% in assenza di rumore del rivelatore e con un diametro della lente di 500 mm, per ridurre il rumore di shot-noise.

3.4.1.2 Variazione della concentrazione rilevabile

La Figura 23 mostra la variazione del coefficiente di correlazione al variare della soglia di CO2 da misurare e per diverse aperture della lente. I restanti parametri sono indicati in Fig.19. Quanto maggiore è la variazione di concentrazione da misurare, tanto migliore sarà l'affidabilità della misura. L'affidabilità cresce con il diametro dell'apertura della lente.

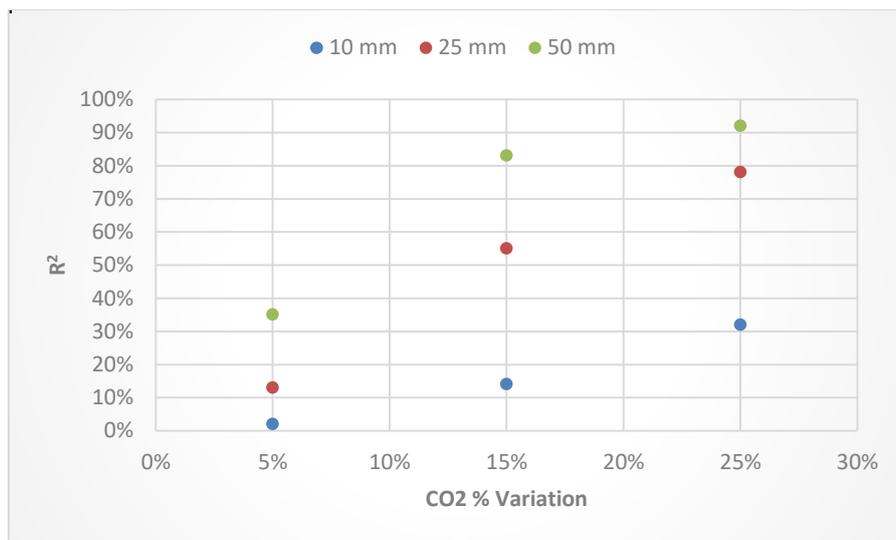


Fig. 23 Variazione del coefficiente di correlazione in funzione della soglia di variazione di concentrazione da misurare.

3.4.2 Effetto delle fluttuazioni

La successiva serie di test, illustrati dalle Figure 24 e 25, è volta a definire la robustezza della misura rispetto a fluttuazioni dei parametri che determinano la radianza incidente sul sistema e che possono inquinare la misura di concentrazione di CO₂.

3.4.2.1 Fluttuazioni e apertura del sistema

Il primo esperimento numerico riguarda la variazione del coefficiente di correlazione in funzione del diametro della lente e per diverse ampiezze delle fluttuazioni.

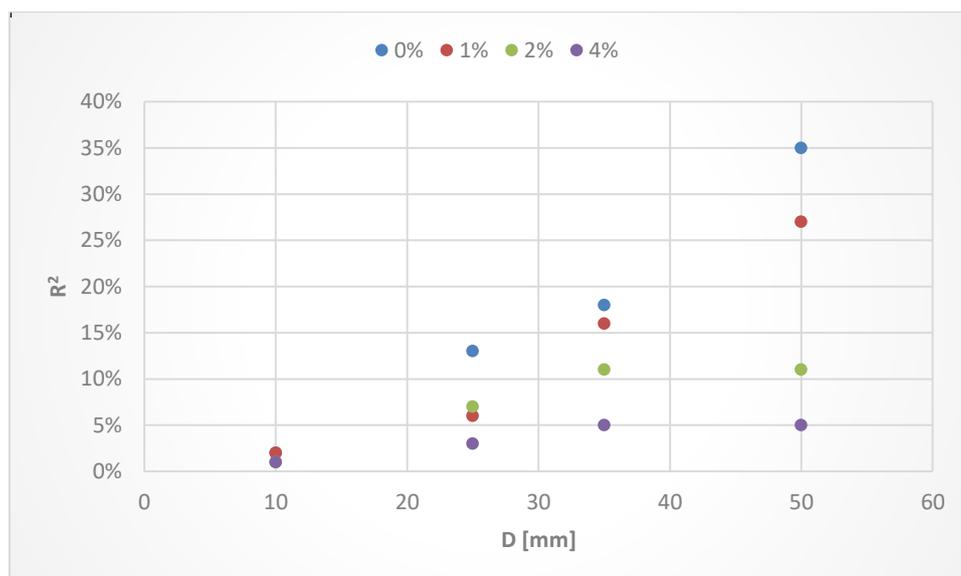


Fig. 24 Variazione del coefficiente di correlazione in funzione del diametro della lente per differenti ampiezze delle fluttuazioni.

3.4.2.2 Fluttuazione dello spessore del gas

Nel secondo esperimento si analizza lo specifico impatto sulla misura derivante da ampie fluttuazioni dello spessore dello strato di CO₂.

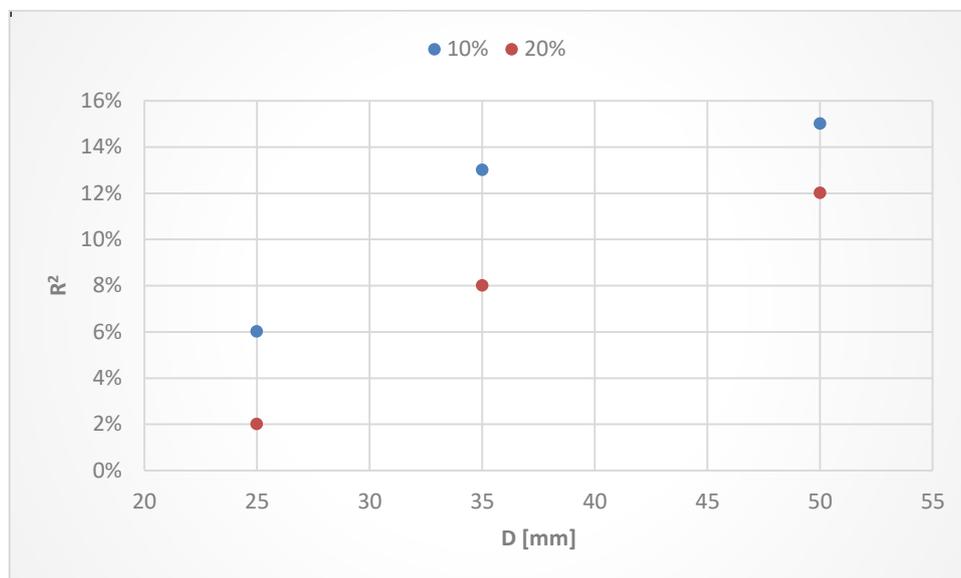


Fig. 25 Variazione del coefficiente di correlazione in funzione del diametro della lente per differenti ampiezze delle fluttuazioni dello spessore di CO₂.

3.5 Configurazione del sistema di misura iperspettrale

Gli elementi base che compongono il sistema sono:

- una camera
- una lente (obbiettivo)
- un sistema di acquisizione delle immagini (frame grabber)
- un PC di controllo

L'intero sistema deve essere sufficientemente leggero e di ingombri contenuti, da poter essere facilmente imbarcato a bordo di un drone professionale, con capacità di carico di qualche kg. Altri aspetti importanti riguardano l'alimentazione del sistema e la capacità di memorizzazione. L'alimentazione deve essere in bassa tensione (DC) per facilitare l'interfaccia con il pacco batterie del drone o un pacco batterie dedicato. La capacità di memorizzazione deve essere sufficientemente ampia da permettere l'immagazzinamento di un'intera sessione di riprese, la cui durata dipende dall'autonomia di volo del drone.

3.5.1 Camera

Le analisi condotte nei paragrafi precedenti forniscono le prime indicazioni circa i requisiti sulla sensibilità termica della camera. In particolare, lo schema di misura ipotizzato non è particolarmente affetto dal rumore del rivelatore. Pertanto il rivelatore selezionato è rappresentato da un array di microbolometri non raffreddato, per minimizzare pesi e volumi.

Semiconductor Devices è un'azienda israeliana leader nella progettazione e costruzione di dispositivi di questo tipo. Figura 26 mostra la telecamera da essi prodotta nella versione broad band; la Tabella 7 riporta le sue caratteristiche tecniche.



Fig. 26 VOx imager, Broad Band.

Tabella 7 Caratteristiche del rivelatore VOx BB della Semiconductors Devices.

PARAMETER	PERFORMANCE
System	Uncooled LWIR Thermal Imager
Detector format	VGA, 640x480 pixel count
Detector pitch	17 μm
Detector material	VOx Microbolometer
Detector package	Ceramic
Spectral range	3 – 14 μm
Sensitivity (30 Hz, f/1)	
Dual Dynamic range	50°C and 250°C
Frame rate	25Hz, 30Hz and <9Hz
Time to image	< 3 sec
Latency	Sub frame
Supply Voltage	5V
Power consumption	< 1.2 watt
TEC-Less operation	Yes
Shutter-Less operation	Yes
Video output 1 (LVCMOS)	8/14 bit Parallel, Glueless VGA AMOLED, BT.656
Video output 2 (LVDS)	Camera Link, simultaneously with the parallel output
Digital zoom	X2, X4
Polarity invert	Yes
Image flip	Yes (horizontal and vertical)
Discrete button inputs	6
Overlay graphics	Text and Bitmap
ENVIRONMENTAL	
Operation temperature	-40°C to +71°C
Storage temperature	-40°C to +85°C
Shock	500G @ 0.5msec, 500 shocks per axis and direction ½ sine
DIMENSION AND WEIGHT	
Size	31x31x29.7 mm
Weight	43 grams

3.5.2 Control PC and PCI Acquisition Board

La scheda di acquisizione è un frame grabber compatibile Camera Link con slot PCI-Ex. Al fine di contenere al massimo volumi, masse e consumo di potenza, si è optato per il prodotto fornito da EPIX, in particolare la scheda PIXCI® EB1miniF, dove il connettore Camera Link è situato su di una scheda separata collegata al grabber tramite un cavo piatto. Entrambi i dispositivi sono illustrati nella Figura 27. Le loro caratteristiche tecniche sono riportate nelle Tabelle 8 e 9.

Questo genere di scheda può essere installato su single board computer per minimizzare ulteriormente pesi e ingombri. Una possibile soluzione è rappresentata dal Nitrogen6_MAX fornito dalla Boundary Devices, che monta un processore ARM Cortex™ A9 quad-core, 1 GHz di frequenza di clock.

La memoria fisica può essere espansa fino a 64 GB. Ogni immagine (senza compressione) occupa circa 0.65 MB, e il sistema di acquisizione è in grado di garantire un flusso pari ad almeno un'immagine ogni 3 secondi, il tempo di registrazione disponibile è pari ad 82 ore, largamente superiore all'autonomia di un drone professionale.

Sia la telecamera sia il sistema di acquisizione sono alimentabili in bassa tensione, pertanto l'alimentazione può essere derivata direttamente dal pacco batterie del drone, previa eventualmente conversione della tensione di alimentazione.



Fig. 27 A sinistra, frame grabber Camera Link. A destra, il frame grabber inserito nel single board computer.

Tabella 8 Caratteristiche tecniche del PC.

Performance (Supports the camera's maximum):	Horizontal Resolution Vertical Resolution Frame Rate Bit Depth
Signal Input & Output:	EIA RS-644 (LVDS) Drivers & Receivers Pixel clock frequencies from 25 to 85 megahertz
Data Transfers:	Supports cameras with data output rates up to 250 megabytes per second Burst data rates to Mini PCIe bus at 2.5 gigabits per second 64 bit memory addressing
Bus Requirement:	PCI Express Mini Card slot
Connectors:	One 26 pin 3M SDR camera link connector for base camera 10 pin header for Trigger, Frame Enable, Strobe, and General Purpose I/O
Power Requirements:	3.3 volts at 150 milliamps

	1.5 volts at 200 milliamps
Certifications:	CE Compliant ROHS Compliant
EPIX Software Support:	Supported by XCAP-Lite (no charge with board purchase), XCAP-Ltd , XCAP-Std , XCLIB , and XCLIBIPL . Compatible with 32-bit & 64-bit Windows 10, 8, 7, Vista, XP, 2000, LINUX, and 32-bit DOS. Also TWAIN and Image-Pro Compatible.

Tabella 9 Caratteristiche tecniche del frame grabber

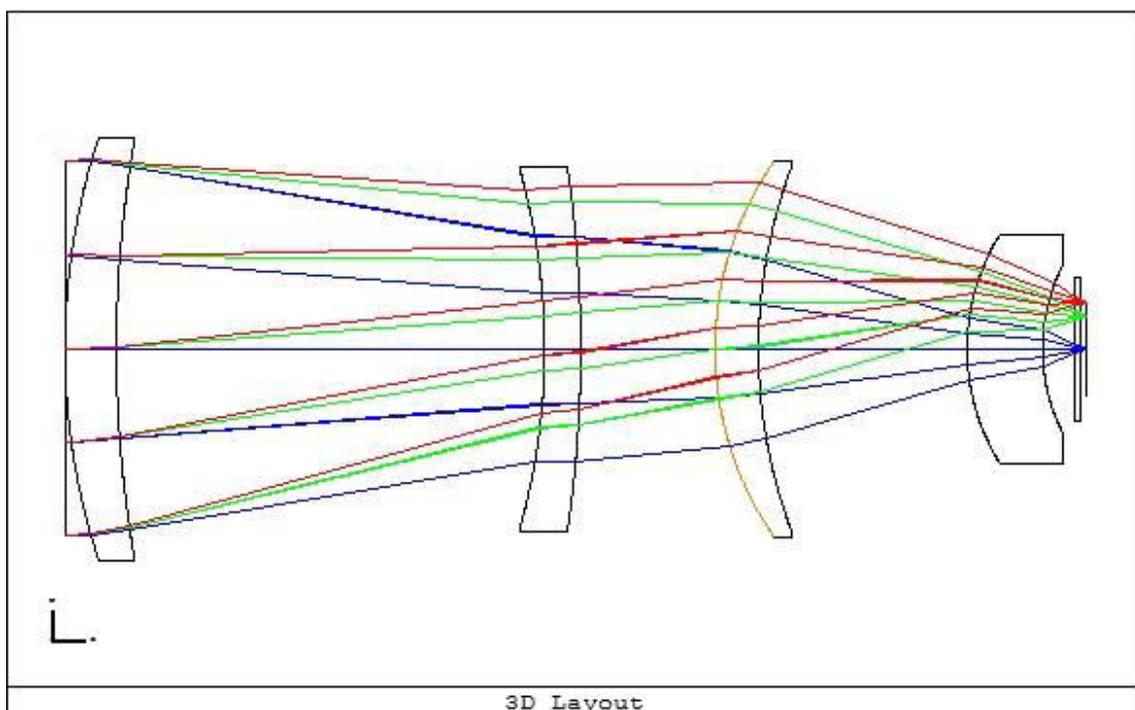
CPU	
CPU Name	NXP/Freescale i.MX6
CPU Type	ARM Cortex™-A9
CPU Cores	4 (Quad-Core or Quad PLUS)
CPU Clock (Max)	1GHz
Memory	
RAM	4GB DDR3
NOR Flash	2MB Serial NOR Flash
eMMC	4GB (expandable to 64GB)
Multimedia	
2D/3D Graphics Acceleration	Vivante™ GC2000 Accelerated 2D and 3D
Video Encode / Decode	1080p60 H.264 Decode, 1080p30 H.264 Encode
Camera Interfaces	2x Parallel, 1x MIPI
Display	
HDMI	v1.4 1920 x 1080
LVDS	2X LVDS, 24-bit
RGB	24-bit RGB
Networking	
Ethernet	10/100/1GB
WiFi	Two Pre-Certified Options: 802.11ac (Nit6Q_MAX_QCA - BD-SDMAC module) or 802.11 b/g/n (Nit6Q_MAX - TiWi-BLE module)
Bluetooth	(included with WiFi Module) BT4.1 (QCA) or Bluetooth 2.1+EDR and Bluetooth 4.0 (TiWi-BLE)
Audio	
Headphone	Yes
Microphone	Analog MIC
Amplifier	2W Audio Amplifier
Connectivity	
I2C	X3
SPI	x1 (via J15)
UART	x2 (RS-232). x1 RS232/RS485. More Available via J15
SD / MMC	x1 microSD
USB	USB 2.0: 3x Host, 1x OTG
SATA	SATA II interface, 3.0 Gbps
RTC	Yes
PCIe	Gen 2.0 + SIM Card
JTAG	Yes
CAN	x1
OS Support	
Linux	Yocto, Ubuntu, Buildroot, Debian
Android	up to Nougat 7.1.1
WindowsCE	N/A
Mechanical Specifications	
Dimensions (L x W)	133mm x 89mm
Environmental Specifications	
Commercial Temp (0 to 70C)	Yes
Industrial Temp (-40C to +85C)	Contact Manufacturer

3.5.3 Lente

Di seguito si riportano I dati del progetto ottico sviluppato in precedenza (Fig 28, 29). In particolare, il sistema T-009B, evidenziato nella Tabella 10, ha le caratteristiche adeguate per l’installazione sulla telecamera. Lo stop frontale consente inoltre l’inserimento di un filtro freddo per ridurre ulteriormente il rumore.

Tabella 10 Lenti progettate per il sistema.

SOLUTION	DESCRIPTION	EPD [MM]	F/#	FOV [DEG]	REQ. PITCH [μ M]	GSD [CM]	FRACTION OF ENSQ. EN. WITHIN HALF PITCH	FOV [M]
T-004	Cooke triplet - telecentric	25.4	3.1	8	31	4	80%	14.0
T-004C	Cooke triplet - not telec.	26.5	3.3	10	33	3.8	75%	17.5
T-005A	Cooke triplet - cold stop	23.5	1.95	11.6	19.5	4.3	80%	20.3
T-009B	Modified USP3363962	60	1.2	12	12	0.17	80%	21.0
T-015A	Modified USP4505535	66.6	1.95	11.2	19.5	0.15	80%	19.6



3D Layout
Fig. 28 Configurazione ottica.

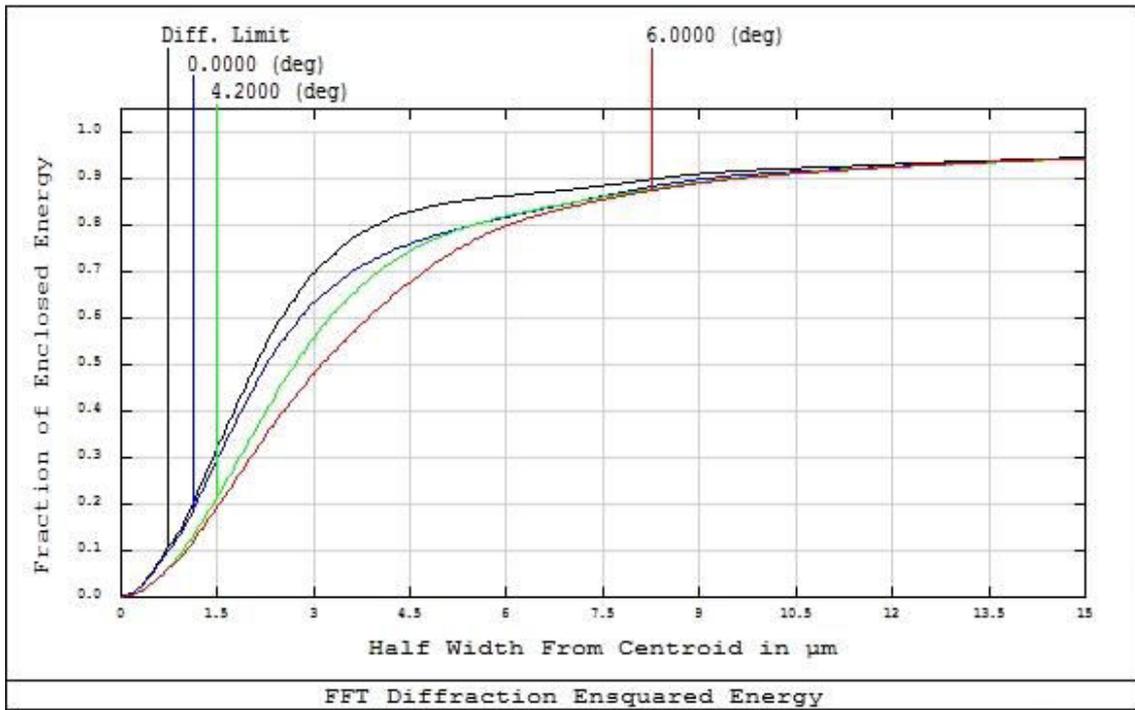


Fig. 29 nsquared energy. Il pitch della camera è 17 micron, compatibile con il disegno ottico.

3.5.4 Prestazioni

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni condotte sul sistema specificato, Figure 30-31-32 e Tabella 11. In particolare, il sistema può fornire una misura sufficientemente robusta di una variazione della concentrazione di CO₂ pari al 10% del valore nominale, anche in presenza di fluttuazioni dei parametri ambientali dell'ordine del 20%, per lo spessore dello strato di gas monitorato, e del 4% per gli altri parametri.

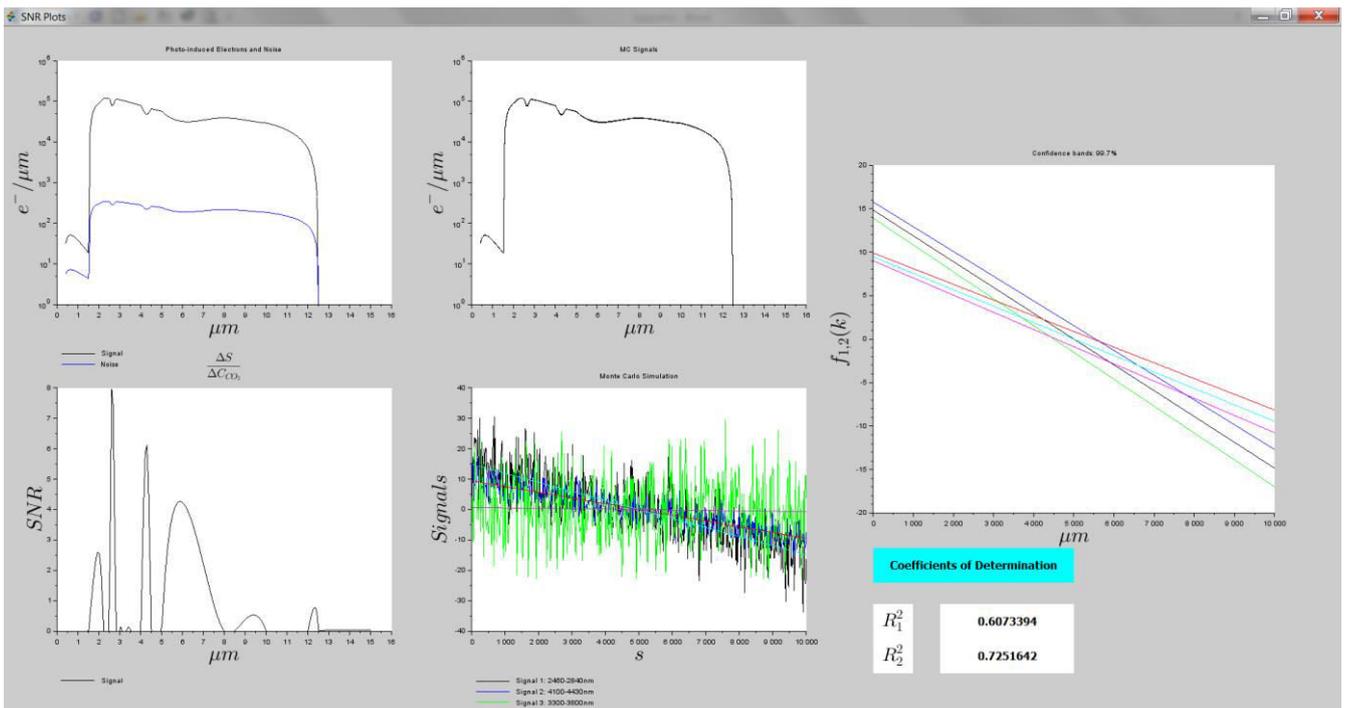


Fig. 30 Risultato dell'analisi corrispondente ai parametri indicati in Figura 31.

Tabella 11 Coefficiente di correlazione per varie configurazioni della lente ed al variare delle fluttuazioni.

D [mm]	CO2	$\Delta p/p$	$\Delta h_{CO2} / h_{CO2}$	R²
60	10%	1%	5%	63%
50	10%	1%	5%	61%
40	10%	1%	5%	60%
30	10%	1%	5%	46%
20	10%	1%	5%	33%
60	5%	1%	5%	32%
50	5%	1%	5%	27%
40	5%	1%	5%	25%
30	5%	1%	5%	15%
20	5%	1%	5%	14%
60	10%	1%	5%	63%
60	10%	1%	10%	55%
60	10%	1%	15%	44%
60	10%	1%	20%	36%
60	10%	1%	25%	30%

Radiometric Model

Inputs				Files
Min. Wave [μm]	0.4	Fitting Poly Deg.	1	Air Transmittance
Max. Wave [μm]	15	CO2 Variation [%]	10	Soil Reflectance
N. Points	200	MC Steps	500	Lens Transmittance
Int. time [s]	1	% Gas Thick	5	QE Data
Lens F/#	2	% Atm. Transm.	1	
CO2 Temp. [K]	300	% Soil. R.	1	
Air Temp. [K]	300	% Sol. Const.	1	
Soil Temp. [K]	300	% Temp. Soil	1	
Layer Thic [m]	10	% Temp. Gas	1	
Pix Size [μm]	17	% Soil Em.	1	
Solar Const [W/m ²]	800	Steps of Integratio	20	
Soil Emissivity	0.5			
Detector NETD [K]	0.05			
Gas Conc. [mol/m ³]	0.02			
Lens Diameter [m]	0.05			
QE C. Wave [μm]	7			
QE Offset	60			
QE Amp	2			
Use QE Model	<input checked="" type="checkbox"/>			

Simulate

Clear

Close




Fig. 31 Parametri delle simulazioni riportate in Tab. 11.

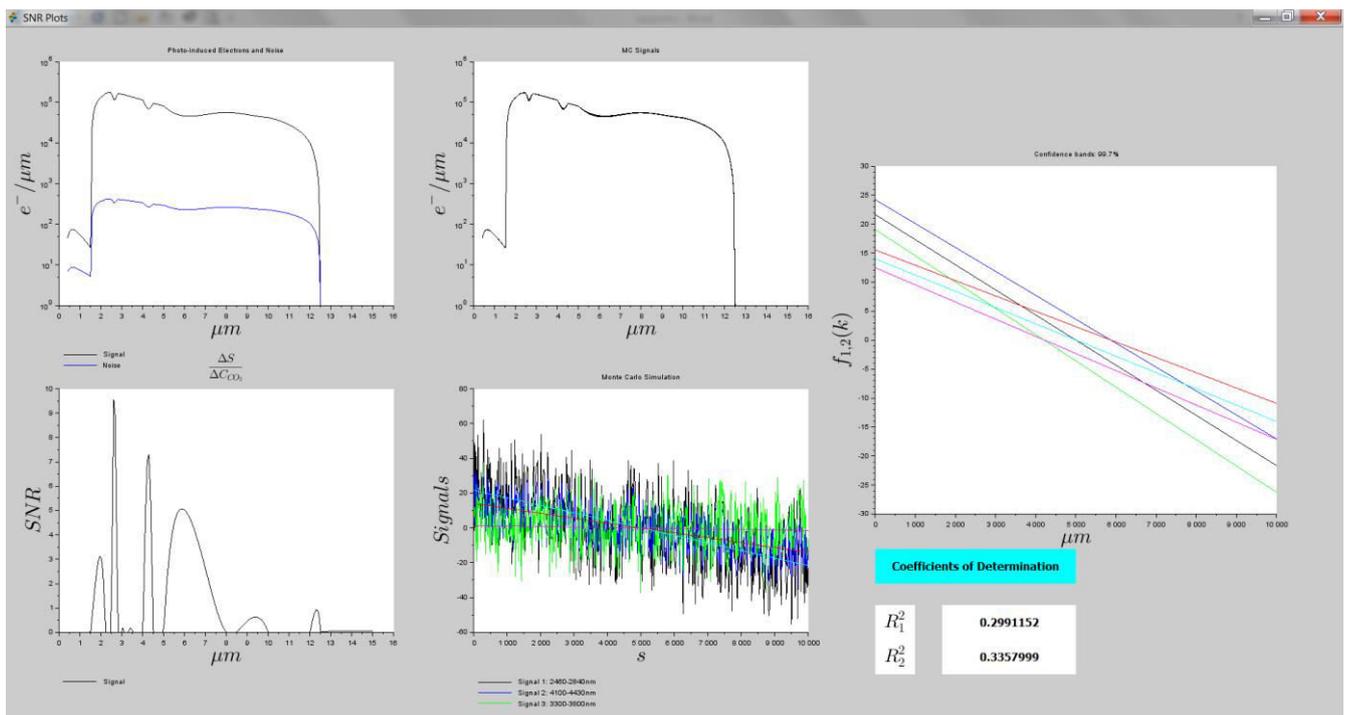


Fig.32 Risultati dell'ultima simulazione riportata in Tab.12.

4 Conclusioni

Nell'ultimo triennio:

1. E' stato modificato il design ottico del filtro interferenziale il quale si avvale dell'utilizzo di materiali tutti dielettrici nel MWIR quali silicio e silice. Il filtro rappresenta una combinazione di due filtri-base. Il primo è un filtro passa-banda di tipo Fabry-Perot la cui cavità varia in spessore consentendo la tunabilità spettrale della banda di trasmissione. Il secondo filtro, da realizzare sulla seconda faccia del substrato, è un filtro non variabile che permette la trasmissione della luce nella larga finestra di interesse, 3000-4900nm, ed è destinato a migliorare la rejection del filtro fuori della zona spettrale di misura.
2. I filtri passa-banda stretto uniformi realizzati con la combinazione silicio/silice dimostrano non solo la compatibilità dei materiali utilizzati ma anche la compensazione dello stress termico. I filtri sono privi inoltre dallo stress igroscopico, sono stabili nel tempo nelle condizioni del laboratorio (5 mesi) e nelle condizioni dell'esercizio in loco.
3. E' stato realizzato un porta-campione di un design specifico il quale consente il monitoraggio ottico visibile-NIR anche durante la deposizione dei filtri per il MWIR; e quindi è stato modificato il sistema di maschere per la deposizione di filtri variabili.
4. E' stato realizzato il primo prototipo del filtro variabile di tipo Fabry-Perot per il range ottico MWIR.
5. E' stato affinato il modello radiometrico.
6. E' stato sviluppato un codice numerico per il calcolo del budget radiometrico.
7. E' stato stimato il budget radiometrico in seconda approssimazione con utilizzo del software appositamente sviluppato.

8. I risultati delle analisi del budget radiometrico nonché degli elementi elettronici come COTS disponibili sul mercato, quali le camere ultraleggere ed elettronica di bordo, hanno permesso di arrivare al design preliminare dell'intero sistema HSI per rilevamento di fughe della CO₂ da drone. Tale sistema può fornire una misura sufficientemente robusta di una variazione della concentrazione di CO₂ pari al 10% del valore nominale, anche in presenza di fluttuazioni dei parametri ambientali dell'ordine del 20%, per lo spessore dello strato di gas monitorato, e del 4% per gli altri parametri.

Una serie di misure ottiche e i valori dettagliati dei parametri radiometrici (emissività e riflettanza dei suoli nelle zone di stoccaggio, irradianza solare tipica) servono a creare un modello radiometrico ancora più realistico. Una campagna di misure ottiche di riflettanza di alcuni suoli tipici delle zone di stoccaggio è stata conclusa nel periodo di estensione del progetto nei mesi di ottobre-dicembre e il risultato è riportato in un documento dedicato.

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, 808400 (June 06, 2011)
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)
5. L.S. Rothman et al., "The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database," J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 110, 533–572 (2009)
6. 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
7. W. Smith, "Modern Optical Engineering", McGraw Hill, 1966
8. José 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
EIE Group s.r.l.	European Industrial Engineering s.r.l.
FIR	Far Infrared

HSI	Hyperspectral Imaging
LVF	Linear Variable Filter
MIR (MWIR)	Medium Infrared
MSI	Multispectral Imaging
NIR	Near infrared
COTS	Components Off The Shelf