



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di un sistema innovativo per
spettrometria d'immagine finalizzato al
rilevamento ambientale della CO₂

Anna Sytchkova, Angela Piegari

SVILUPPO DI UN SISTEMA INNOVATIVO PER SPETTROMETRIA D'IMMAGINE FINALIZZATO AL RILEVAMENTO AMBIENTALE DELLA CO₂

Anna Sytchkova, Angela Piegari (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili

Obiettivo: PARTE B - Sviluppo di diagnostica avanzata per applicazioni in ossi-combustione e monitoraggio della CO₂

C.2: Monitoraggio della CO₂ mediante sistemi ottici

Responsabile del Progetto: Franca Rita Picchia, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE ALLE PROBLEMATICHE DEL MONITORAGGIO REMOTO DELLE ZONE DI STOCCAGGIO DI CO ₂	5
2 DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ SVOLTA	6
2.1 SPETTROSCOPIA D'IMMAGINE PER IL RILEVAMENTO REMOTO DEL LIVELLO DEL CO ₂	6
2.2 FILTRI INTERFERENZIALI DEL SISTEMA: IL FILTRO VARIABILE (LVF) E IL FILTRO COLD-CUT	7
2.3 TESTA OTTICA	9
3 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	9
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	10
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	10

Sommario

In questo rapporto tecnico è descritta la progettazione del sistema per il rilevamento della variazione del livello dell'anidride carbonica (CO₂) da implementare nel monitoraggio dei siti di stoccaggio di questo gas. Il sistema è 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 più ampio e la possibilità dell'acquisizione/elaborazione quasi immediata dei dati. Alla base di questi vantaggi c'è l'utilizzo delle ottiche interferenziali innovative sviluppati *ad hoc*.

1 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'Ecceellenza 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 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 rivolge ai 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.

L'ENEA partecipa alle attività di ricerca nella zona di stoccaggio della CO₂ nel bacino del Sulcis. 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 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.

2 Descrizione dell'attività svolta

2.1 Spettroscopia d'immagine per il rilevamento remoto del livello del CO₂

Nell'anno di riferimento è stato svolto uno studio di fattibilità di spettrometria d'immagine con un sistema innovativo ultraleggero portatile e ad ampio spettro ottico, finalizzato al monitoraggio di ampie aree insistenti sui siti di stoccaggio geologico della CO₂ da un aeromobile a pilotaggio remoto (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) ad esempio un drone, Fig.1.

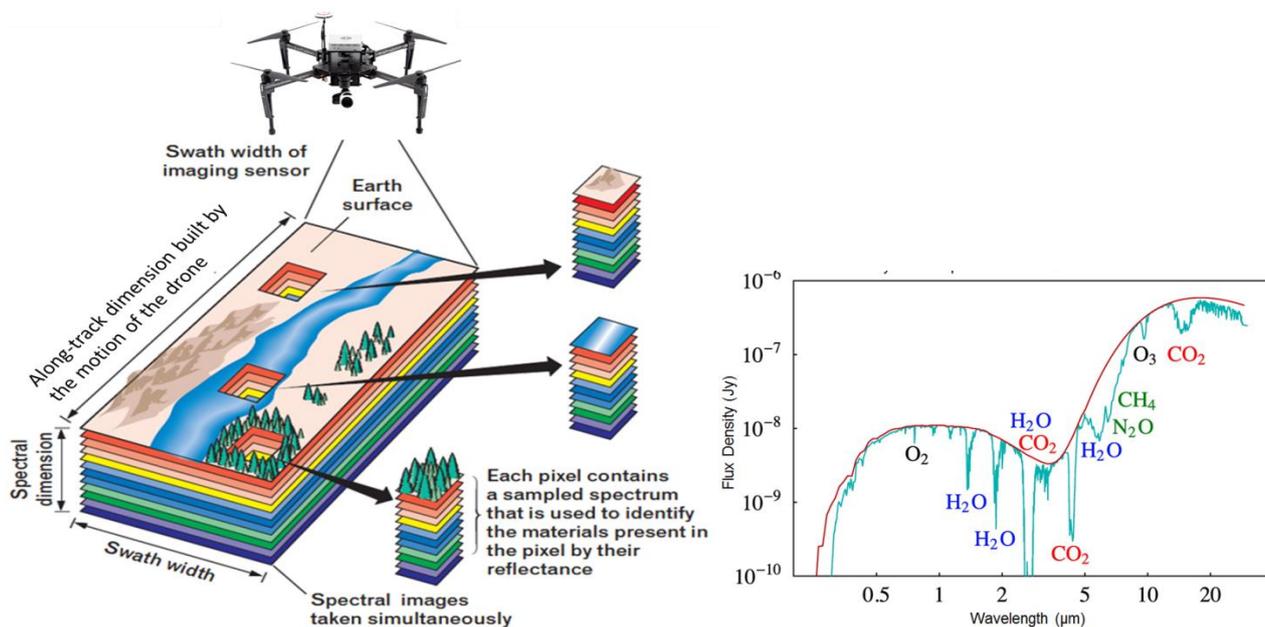


Figura 1. Presentazione schematica di un sistema per la spettroscopia d'immagine da acquisizione remota (sinistra) e uno spettro tipico di assorbimento atmosferico con tre bande di CO₂ evidenziate: due bande nel MIR 2.7 μm, 4.3 μm e una nel FIR 15 μm.

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 con il sistema precedentemente citato [2] si è rivelato inefficace, si mira alla realizzazione di una camera iperspettrale operante nel medio IR (MIR, lunghezze d'onda 2-5 μm). Inoltre la camera deve essere sufficientemente leggera da essere trasportabile da un drone di basso-medio carico utile (payload). Per raggiungere questi due obiettivi, la camera sarà basata su elementi-chiave sviluppati appositamente: i filtri ottici interferenziali e la testa ottica.

Sono tre le caratteristiche essenziali che determinano la performance del sistema e quindi rendono fattibile il monitoraggio cui il sistema è destinato: il rapporto segnale/rumore, la risoluzione spettrale e il tempo di acquisizione/elaborazione dei dati. Queste tre specifiche sono influenzate da diversi parametri del sistema quali le caratteristiche del drone, la costruzione della camera, il design della testa ottica e dei filtri interferenziali costituiti da una serie di strati sottili di vari materiali che rivestono una finestra ottica (substrato). E' necessaria una sinergia di decisioni considerando diversi aspetti interconnessi del problema e quindi ottimizzando i parametri del sistema. Lo studio di fattibilità svolto nel periodo di riferimento ha riguardato in particolare l'articolazione del problema su questi diversi piani di sviluppo. Una volta definito l'approccio generale, si è passato all'elaborazione dei primi design sia della testa ottica per la camera scelta sia dei filtri interferenziali.

Schematicamente i livelli di progettazione e le problematiche legate possono essere riassunte come in Fig.2.

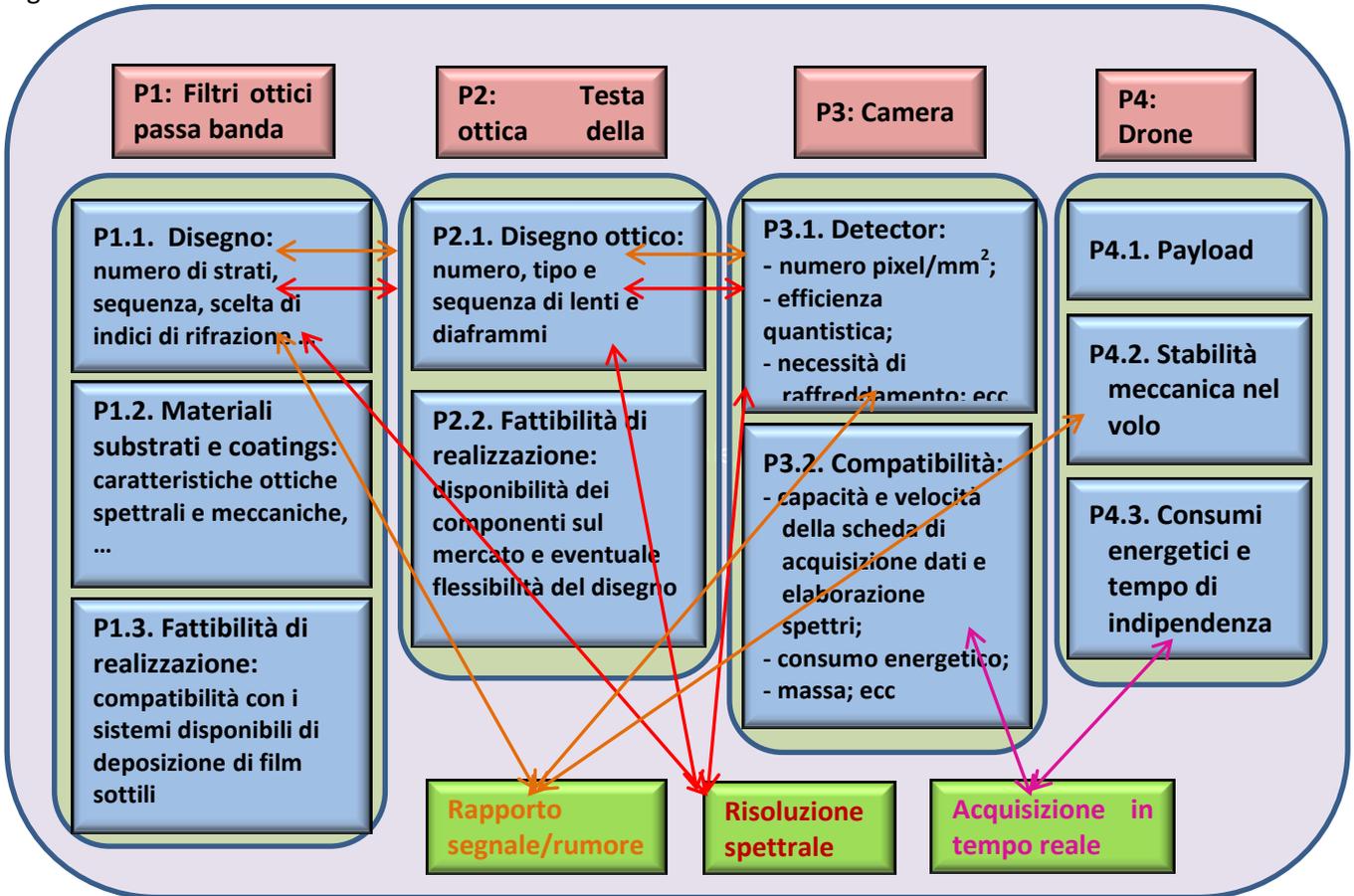


Figura 2. Schema dei gruppi di livelli di progettazione e realizzazione di un sistema di monitoraggio ottico remoto da UAV. Le frecce e i quadri di raggruppamento indicano (non esaustivamente) le interconnessioni tra le problematiche principali e la reciproca determinazione dei parametri del sistema.

Ad esempio, alla base della definizione del design preliminare della testa ottica dello spettrometro ci sono la scelta del sensore MIR e del design del filtro ottico per l'acquisizione del segnale, una volta stabilita la parte dello spettro elettromagnetico dove sono presenti una o più bande di assorbimento caratteristiche per la CO₂. D'altro canto, il design della testa ottica detta le specifiche spettrali del filtro stesso, per quanto concerne il filtro di tipo variabile (parte dispersiva dello spettrometro), o addirittura influisce sulla necessità d'inserimento di un altro filtro aggiuntivo di taglio tipo cold-cut.

2.2 Filtri interferenziali del sistema: il filtro variabile (LVF) e il filtro cold-cut

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 MIR, la camera utilizza un filtro variabile come parte dispersiva nell'acquisizione dello spettro nel MIR, 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 (Fig.3). 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. Sono state selezionate finestre ottiche in fluoruro di calcio (CaF_2), come le più adatte alla spettrometria nel MIR, da rivestire con strati di materiali trasparenti nel MIR (ossidi o solfuri di metalli). Per le prime prove sperimentali sono stati scelti come materiali più opportuni l'ossido di silicio e di alluminio (SiO_2 e Al_2O_3).

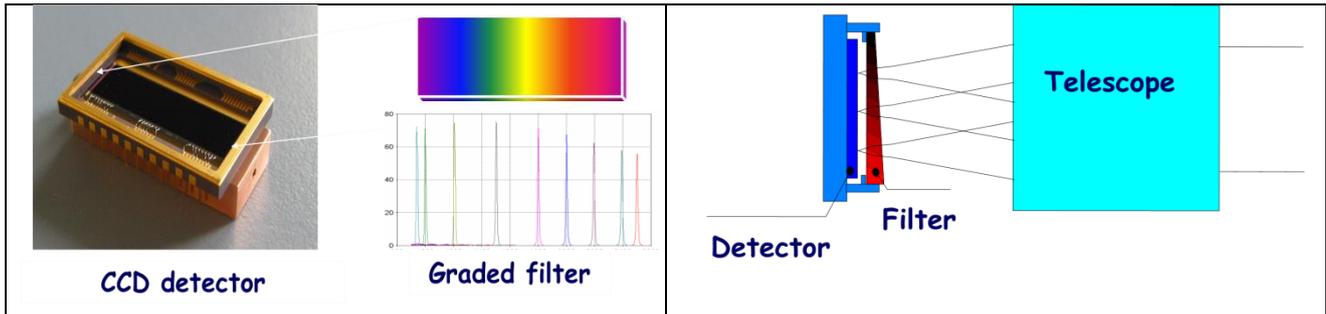


Figura 3. Il principio di funzionamento di un filtro variabile come elemento dispersivo di una camera iperspettrale. Ogni riga verticale del filtro (figura a sinistra) trasmette luce di una singola lunghezza d'onda che permette l'acquisizione di quella banda spettrale dalla corrispondente linea di pixel del sensore CCD accoppiato, eliminando tradizionali elementi di selezione spettrale più ingombranti e pesanti. Il sistema di lenti (Telescope sulla figura destra) appositamente sviluppato permette la proiezione dell'immagine della scena osservata.

Il disegno del filtro (la sequenza e gli spessori degli strati, nonché lo spostamento del picco della banda di trasmissione sulla superficie del filtro) è condizionato dalla scelta del sensore e dallo schema della testa ottica della camera in generale, come pure dalle richieste spettrali e radiometriche dettate dal presunto livello di CO_2 da rilevare. Basandosi sull'esperienza acquisita nell'ambito di progetti per lo spazio, per il filtro variabile è stata scelta una configurazione contenente strati di materiali metallici e dielettrici. Tali strati sono caratterizzati dall'indice di rifrazione n del materiale e dallo spessore fisico. La sequenza degli strati lungo la profondità del filtro è riportata in Fig.4, essendo $n=1.62$ per Al_2O_3 , $n= 2.22$ per ZnO_2 , $n=1$ per argento. Il terzo materiale impiegato, argento (Ag) è caratterizzato anche dal coefficiente di estinzione k che in questo tipo di filtri riveste un ruolo importante, al fine di ottenere l'andamento spettrale della trasmittanza del filtro come illustrato in Fig.4.

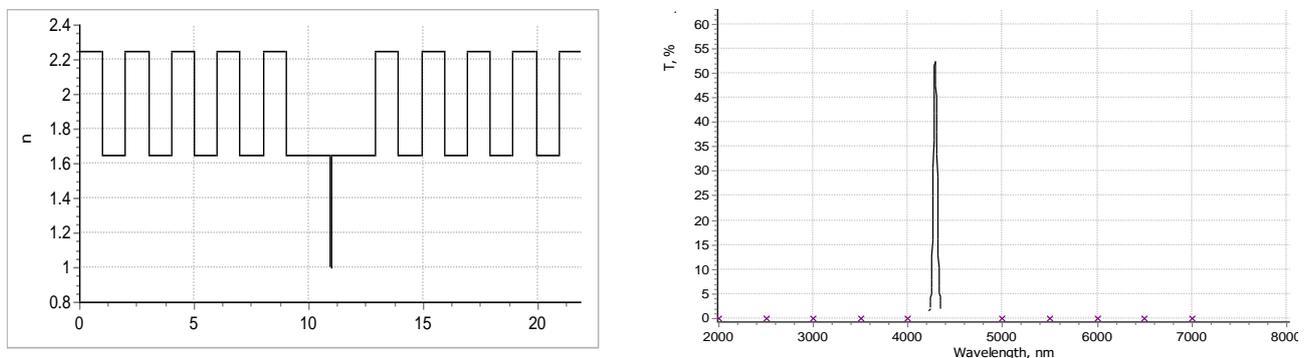


Figura 4. Disegno ottico del filtro interferenziale a 21 strati: Indici di rifrazione degli strati lungo lo spessore del filtro (a sinistra); Trasmittanza spettrale del filtro centrato a 4300 nm.

Oltre al filtro variabile a banda stretta, nella camera è necessario un filtro di taglio cold-cut che serve per la preselezione spettrale della radiazione incidente bloccando la parte di onde più corte del necessario per la misura. Ciò permette il miglioramento del rapporto segnale/rumore del sistema. Basandosi sul design della

testa ottica, il filtro cold-cut può essere scelto tra quelli disponibili sul mercato o, se necessario, sviluppato e prodotto nei laboratori ENEA.

2.3 Testa ottica

Il disegno iniziale del filtro è stato quindi alla base del primo studio sulle possibili soluzioni per il disegno della testa ottica dello strumento. Tale studio è stato affidato alla ditta EIE Space Technologies, specializzato nel design ottico per applicazioni aero-spaziali. Lo studio ha definito due disegni ottici della camera particolarmente consigliabili confrontando i tre principali parametri di cinque soluzioni proposte: apertura numerica, campo di vista e fattibilità di realizzazione. Le due scelte sono rappresentate in Fig.5.

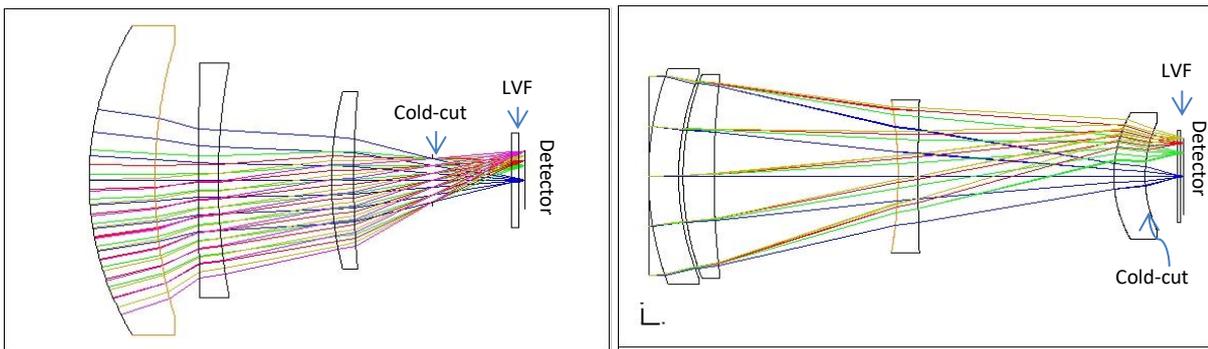


Figura 5. Disegni ottici scelti come possibili per implementazione: non-telecentrico (a sinistra) e telecentrico (a destra). Le soluzioni sono diverse anche per il posizionamento del filtro interferenziale di taglio tipo cold-cut.

Una delle importanti differenze tra questi due disegni consiste nel modo d’inserimento del filtro di tipo *cold-cut* necessario per la preselezione spettrale (taglio della parte dello spettro di lunghezze d’onda più corte). I particolari saranno discussi nella versione completa del rapporto.

3 Conclusioni e sviluppi futuri

Lo studio di fattibilità svolto ha portato alla formulazione delle principali problematiche nella realizzazione di un sistema HSI su UAV. Sono stati proposti possibili design delle ottiche interferenziali e della camera iperspettrale nel MIR, range spettrale sinora non utilizzato per HSI su UAV e in particolare per il monitoraggio delle zone di stoccaggio della CO₂.

I vantaggi principali dell’osservazione in questo range sono legati all’inconfondibile “impronta” spettrale della CO₂ con le sue bande di assorbimento distinte dalle altre specie gassose e dall’acqua. L’approccio iperspettrale inoltre permette l’osservazione di più caratteristiche contemporaneamente. La soluzione di una camera basata sul filtro variabile non solo riduce notevolmente i tempi dell’acquisizione dell’immagine (in uno “shot” del rivelatore si acquisisce tutto lo spettro) ma anche alleggerisce sensibilmente la camera. Quest’ultimo fattore diminuisce le richieste sulla portata del drone, o a parità di portata, consente di avere un computer a bordo per la diretta e immediata pre-elaborazione dei dati acquisiti, permettendo quindi il monitoraggio dei siti in tempo reale.

Lo studio ha indicato le linee guida per la realizzazione dei primi prototipi dei filtri interferenziali variabili nel MIR, soggetto di ricerca nella prossima annualità. Sulla base della loro performance sarà costruito il primo prototipo della testa ottica.

4 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); 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 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