



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA TOR VERGATA
Master in Ingegneria e Diritto Internazionale dello Spazio nei Sistemi Satellitari
di Comunicazione, Navigazione e Sensing

TESI DI MASTER

L'uso duale dei dati satellitari radar, ottici e iperspettrali

Relatore:

Ing. Franco MARUCCI

Candidato:

Ten. Antonio CAVALLO

ANNO ACCADEMICO 2018-2019

Alla mia famiglia e Silvia

Indice

1	Introduzione	1
2	Fondamenti del telerilevamento da satellite per l'osservazione della Terra	3
2.1	Lo spettro elettromagnetico	4
2.1.1	L'ultravioletto	5
2.1.2	Il visibile	5
2.1.3	L'infrarosso	5
2.1.4	Le microonde	6
2.2	Interazione tra elettromagnetismo e materia	6
2.2.1	La trasmissività atmosferica	7
2.2.2	Il corpo nero	8
3	I sensori	10
3.1	TLR nel visibile	11
3.2	TLR nel vicino e medio infrarosso	11
3.3	TLR nell'infrarosso termico	12
3.4	TLR nelle microonde	12
3.5	Caratteristiche delle immagini satellitari radar, ottiche ed iperspettrali	13
4	La tecnologia dei sensori radar, ottica e iperspettrali	17
4.1	La missione Pr.IS.M.A	17
4.1.1	Caratteristiche e prestazioni	18
4.1.2	Le immagini iperspettrali	20
4.2	COSMO-SkyMed	22
4.2.1	Caratteristiche e prestazioni	24
4.3	OPTSAT-3000	25
4.3.1	Caratteristiche e prestazioni	26

5	L'uso duale della tecnologia radar, ottica ed iperspettrale nella sorveglianza marittima	27
5.1	Identificazione del target con sensore ottico	29
5.1.1	Land-masking	30
5.1.2	Rimozione o mitigazione di effetti atmosferici .	30
5.1.3	Rilevazione dell'obiettivo	32
5.1.4	Il riconoscimento	33
5.1.5	La classificazione	33
5.2	Identificazione del target con sensore SAR	34
5.2.1	Land-masking	34
5.2.2	Pre-processamento	35
5.2.3	Pre-screening	35
5.2.4	Gli algoritmi di riconoscimento	36
5.3	Identificazione del target con sensore iperspettrale . . .	37
5.3.1	Il pre-processamento e la rimozione del back-ground	37
5.3.2	Rilevazione dell'obiettivo	39
6	Il co-utilizzo delle informazioni dalle immagini radar, ottiche e iperspettrali nella sorveglianza marittima	40
6.1	L'uso del sensore radar	40
6.1.1	Il contributo di PRISMA	41
6.2	Il ruolo dell'intelligenza artificiale	47
6.2.1	Le reti neurali	48
6.2.2	Applicazione dell'AI al telerilevamento satellitare	49
7	Altre applicazioni nel settore difesa, sicurezza ed intelligence	51
7.1	Scoperta di oggetti mimetizzati	51
7.2	Individuazione di mine e dispositivi IED	52
7.3	Rivelazione di target noti	52
8	Conclusioni	54

Abbreviazioni ed Acronimi

PRISMA	<i>Precursore Iperspettrale della Missione Applicativa</i>
ASI	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i>
SMD	<i>Stato Maggiore Della Difesa</i>
IED	<i>Improvised Explosive Devices</i>
EM	<i>Elettromagnetico</i>
IR	<i>Infrarosso</i>
NIR	<i>Near Infrared (Vicino Infrarosso)</i>
IFOV	<i>Instantaneous Field Of View</i>
TLR-SAT	<i>Telerilevamento Satellitare</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
PAN	<i>Pancromatico</i>
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
COSMO-SkyMed	<i>COnstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation</i>
AIS	<i>Automatic Identification System</i>
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
CFAR	<i>Constant False Alarm Rate</i>
AI	<i>Artificial Intelligence</i>

Capitolo 1

Introduzione

Il telerilevamento da satellite, anche noto con il termine *remote-sensing*, rappresenta un efficace strumento diagnostico-investigativo che consente l'osservazione della Terra e l'acquisizione di informazioni da una prospettiva privilegiata e su scala globale.

Tra le tipologie di sensori disponibili, quelli di tipo attivo sono stati sicuramente i più studiati e utilizzati per la loro flessibilità d'impiego che prescinde dalle condizioni di illuminazione solare e dalla presenza di coperture nuvolose. Tuttavia, negli ultimi anni, è fortemente cresciuto l'interesse per il settore dei sensori passivi quali i multi e iper-spetttrali, che offrono una capacità di osservazione della scena complementare ai sensori di tipo attivo.

I sensori multi ed iper-spetttrali utilizzano lunghezze d'onda nello spettro del visibile e dell'infrarosso e forniscono immagini in cui il contributo informativo di ogni singolo pixel consente di estrarre, mediante opportune tecniche e algoritmi di elaborazione, informazioni dettagliate della scena presa in esame. Ciò che distingue i sensori multispettrali da quelli iper-spetttrali è il numero di bande di frequenza utilizzate, che rappresentano i canali di acquisizione: nel primo caso sono poche decine, nel secondo possono arrivare fino ad alcune centinaia. Gli intervalli di lunghezze d'onda di tali bande non sono contigui, in quanto tali sensori possono essere utilizzati con efficienza nelle sole zone dello spettro in cui l'atmosfera è trasparente e non introduce disturbi.

Il campo di utilizzo dei sensori iper-spetttrali va dalla capacità di identificazione chimica dei materiali alla distinzione di oggetti naturali e man-made, dal monitoraggio ambientale alla scoperta di dispositivi IED (improvized explosive device), dall'individuazione di eventi naturali ad applicazioni per la difesa e la sicurezza; la straordinaria versatilità di utilizzo li rende un validissimo strumento di possibile utilizzo duale.

E' opportuno evidenziare, inoltre, che nelle applicazioni ad uso duale l'uso di sensori diversi e

complementari rappresenta un moltiplicatore delle prestazioni complessive dei singoli sistemi.

L'Italia, con il lancio del satellite PRISMA dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), avrà un ruolo di primissimo piano nella scena europea ed internazionale poiché potrà vantare la disponibilità di un nuovo payload iperspettrale, che andrà ad aggiungersi al Radar ad Apertura Sintetica (SAR) della costellazione COSMO-SkyMed e alla capacità ottica ad altissima risoluzione di OPTSAT-3000. Per mettere in atto una sinergia tra sistemi non omogenei tra loro, le agenzie spaziali di diversi stati stanno investendo risorse per approfondire ed esplorare al meglio la tematica del co-utilizzo delle immagini satellitari provenienti da più fonti.

In questo scenario caratterizzato dall'alto grado innovativo, lo scopo del presente studio è illustrare nel dettaglio vantaggi, svantaggi e valore aggiunto di ciascuno dei sensori di cui l'ASI e la Difesa sono dotati, fornendo anche elementi di dettaglio riguardanti la metodologia di analisi delle singole immagini. Lo studio effettuato è prettamente incentrato sull'utilizzo combinato e l'integrazione dei dati ottici, radar ed iperspettrali per applicazioni di interesse sia militare che civile (duali).

Nel corso della trattazione, sono state esplorate le potenzialità del co-utilizzo dei dati relativamente al tema della sorveglianza marittima, argomento convenuto di comune interesse tra ASI e Stato Maggiore della Difesa. Risulta evidente, tuttavia, che il concetto della correlazione di immagini satellitari ricavate da sensori di diversa natura può essere estesa a molteplici campi di impiego. In aggiunta, è stato esplorato il tema dell'Intelligenza Artificiale (AI), che rappresenterà un mezzo sempre più imprescindibile per poter elaborare e sfruttare al meglio l'enorme quantità di dati che sarà possibile telerilevare. A tal proposito, e a conferma dell'importanza del tema dell'AI, sono state studiate ed approfondite alcune attività che potrebbero avere importanti ricadute in ambito economico e geo-politico.

Inoltre, data la componente innovativa introdotta dalla missione PRISMA, sono state sviluppate delle potenziali applicazioni nel settore difesa, sicurezza e intelligence legate all'analisi e all'elaborazione delle immagini iperspettrali che saranno disponibili non appena il satellite sarà posizionato in orbita.

Infine, il documento si conclude con un'analisi finale dello studio delle applicazioni presentate e fornisce degli orientamenti per sviluppi futuri.

Capitolo 2

Fondamenti del telerilevamento da satellite per l'osservazione della Terra

Il Telerilevamento (o *Remote Sensing*), è una disciplina tecnico-scientifica che permette di ricavare informazioni quantitative e qualitative, misurando l'emissione, la trasmissione e la riflessione di radiazioni elettromagnetiche di superfici senza entrare in contatto con esse. Il telerilevamento è, quindi, l'insieme di tutti i metodi di osservazione della Terra nei quali l'energia elettromagnetica costituisce il veicolo di trasporto dell'informazione dall'oggetto di indagine al sensore. Solitamente il rilievo di una superficie con tecniche di telerilevamento prevede tre fasi distinte:

- La raccolta dei dati (tramite piattaforme terrestri, aerei, satelliti)
- L'elaborazione (tramite tecniche e applicativi software)
- L'analisi (interferometria, analisi spettrale, analisi statistica, ...)

Il processo del telerilevamento vede, come mostrato in Fig. 2.1, due possibili fonti di energia elettromagnetica a seconda si tratti di sensori attivi o passivi (vedi cap.3). Nel caso di sensore attivo, è esso stesso ad emettere energia elettromagnetica e a ricostruire, con opportune tecniche e considerando molteplici fattori esterni, un'immagine della scena osservata (flusso D - B - C - D).

Viceversa, i sensori passivi sfruttano la presenza del sole e misurano i valori di radianza che caratterizzano i pixel della scena sotto osservazione (flusso A - B - C - D). In entrambi i casi, l'immagine acquisita viene inviata al segmento di terra negli slot temporali nei quali il satellite

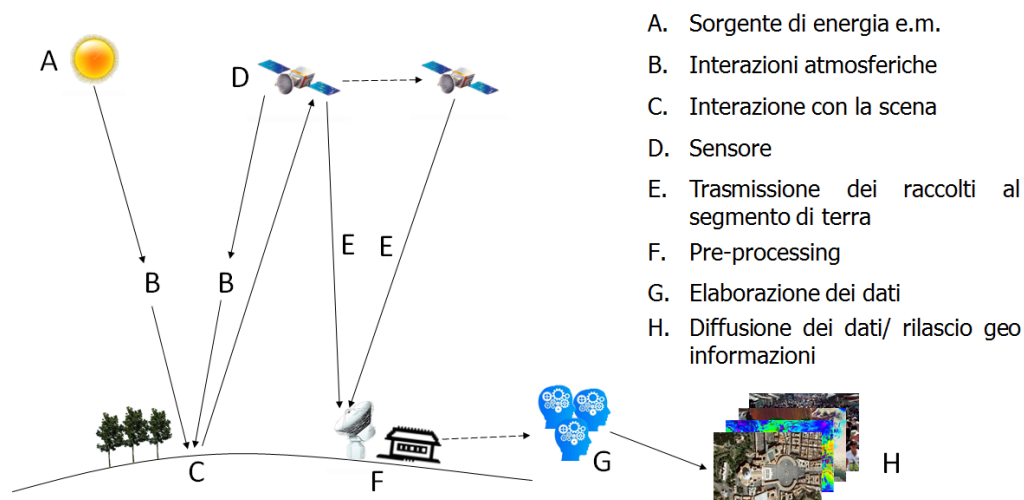


Figura 2.1: Le fasi che compongono l'operazione di telerilevamento.

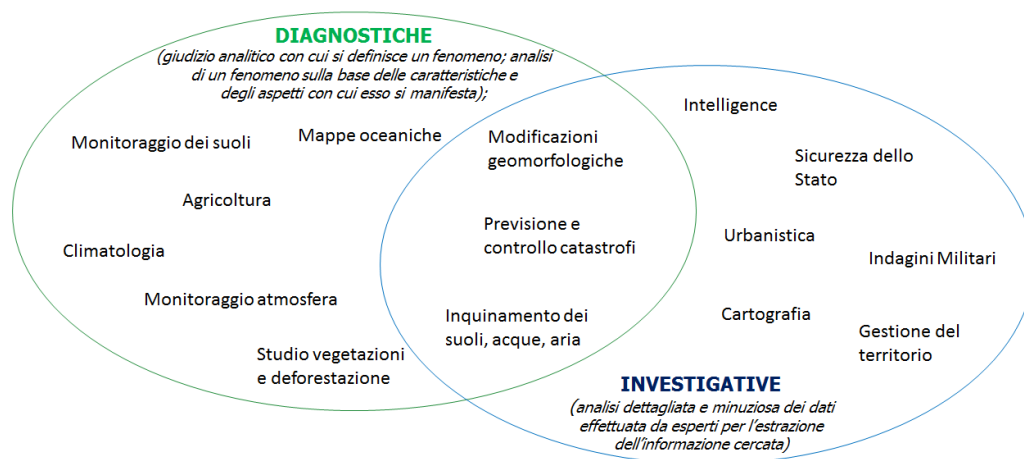


Figura 2.2: Finalità del telerilevamento satellitare.

entra in visibilità, per poi essere elaborata da opportuni calcolatori e successivamente interpretati dall'uomo. L'elaborazione dell'immagine rappresenta la fase cardine del processo di estrapolazione delle informazioni, e verrà trattata nel dettaglio nei capitoli successivi.

Infine, le immagini vengono diffuse, pubblicate, archiviate o vendute a seconda della loro natura, talvolta corredate da interpretazione di esperti del settore e quindi sotto forma di geo-informazioni.

2.1 Lo spettro elettromagnetico

Lo spettro elettromagnetico (o spettro EM) è l'insieme di tutte le possibili onde elettromagnetiche caratterizzate da una lunghezza d'onda e da una frequenza. Queste due componenti sono inversamente proporzionali, per questo, al crescere della frequenza calerà la lunghezza d'onda del

segnale misurato. Lo spettro rappresenta un insieme di frequenze continue da zero ad infinito. E' quindi possibile definire una classificazione delle onde elettromagnetiche, partendo da quelle con lunghezze d'onda minori e proseguendo in ordine crescente:

Tipologia Onda	Lunghezza d'onda
Raggi X	$1\text{pm} < \lambda < 10\text{nm}$
Ultravioletti	$10\text{nm} < \lambda < 400\text{nm}$
Luce Visibile	$400\text{nm} < \lambda < 700\text{nm}$
Infrarosso	$700\text{nm} < \lambda < 1\text{mm}$
Microonde	$1\text{mm} < \lambda < 1\text{m}$
Onde Radio	$\lambda > 1\text{m}$

2.1.1 L'ultravioletto

Le radiazioni ultraviolette hanno una lunghezza d'onda compresa tra 10 e 400 nm. Queste radiazioni elettromagnetiche influiscono sulle reazioni chimiche degli organismi viventi. Ad esempio, sono le radiazioni che causano la produzione della melanina, ma non rivestono un ruolo importante nel campo del telerilevamento satellitare.

2.1.2 Il visibile

Lo spettro del visibile si trova nella parte centrale dello spettro ottico, il quale comprende anche parte dei raggi infrarossi e di quelli ultravioletti. E' composto da quella parte di spettro elettromagnetico che include tutte le colorazioni percepite dall'occhio umano, spaziando dal rosso al viola. Le lunghezze d'onda corrispondenti allo spettro visibile vanno circa dai 400nm ai 700nm, come mostrato in fig. 2.3.

2.1.3 L'infrarosso

La regione infrarossa (regione dello spettro posta oltre il rosso), compresa fra 0.7 e 100 μm , ha 4 sottointervalli di particolare interesse: IR riflesso (0.7-3.0 μm), IR fotografico (0.7-0.9 μm) ovvero il range di sensibilità delle pellicole e le bande termiche a (3-5 μm) e (8-14 μm). Fino alla lunghezza d'onda di 3 μm la radiazione è sostanzialmente dovuta alla riflessione della radiazione solare e non contiene quindi informazioni circa le proprietà termiche delle superfici; viene quindi chiamata infrarosso riflesso. Infine, la radiazione con lunghezza d'onda da 7 a 15 μm circa viene chiamata infrarosso termico o infrarosso emesso poiché deriva dalla emissione delle superfici a causa della loro temperatura assoluta.

2.1.4 Le microonde

La regione delle microonde è la più importante dello spettro ai fini del telerilevamento, va da 0.1 a 100 cm ed è suddivisa in sottointervalli o bande di frequenza; include i range di frequenze della maggior parte dei sistemi radar che producono la radiazione a microonde che illumina gli oggetti e viene da questi riflessa. La regione di lunghezze d'onda maggiori (frequenze più basse) oltre i 100 cm corrisponde alle bande radio. In aggiunta, le microonde non sono riflesse dalla ionosfera bensì la attraversano. Per questa ragione le microonde sono utilizzate anche per le comunicazioni verso i satelliti in orbita.

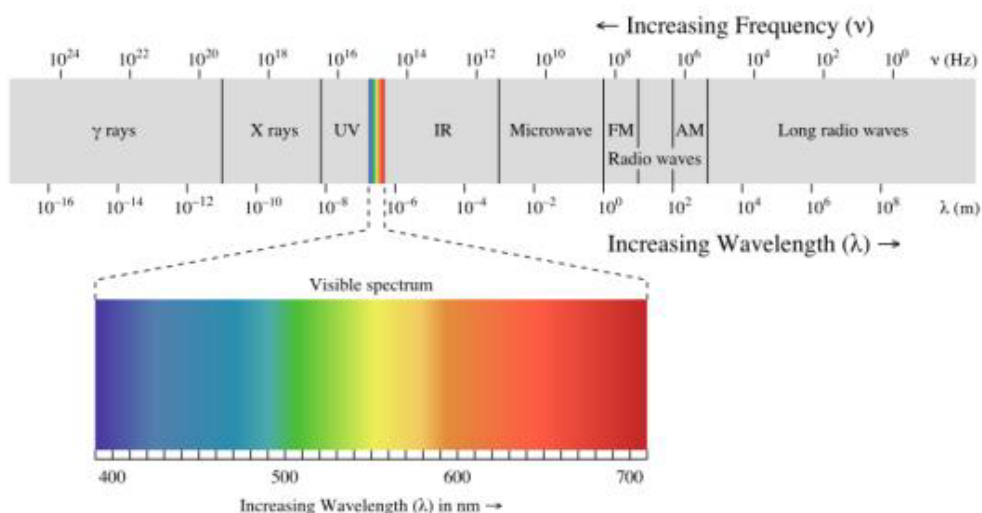


Figura 2.3: Lo spettro elettromagnetico.

2.2 Interazione tra elettromagnetismo e materia

In un sistema di telerilevamento la radiazione elettromagnetica non viaggia nel vuoto ma attraversa l'atmosfera e le particelle, ed i gas che la costituiscono possono modificarne la natura. Questi effetti sono causati da meccanismi di interazione di varia natura tra onda e materia così riassumibili:

- **riflessione:** l'onda incidente viene riflessa nella direzione speculare rispetto a quella incidente;
- **assorbimento:** è il fenomeno nel quale parte dell'energia radiante, a diverse lunghezze d'onda, viene trasferito alle molecole che costituiscono l'atmosfera (ozono, anidride carbonica, vapore acqueo, ecc);

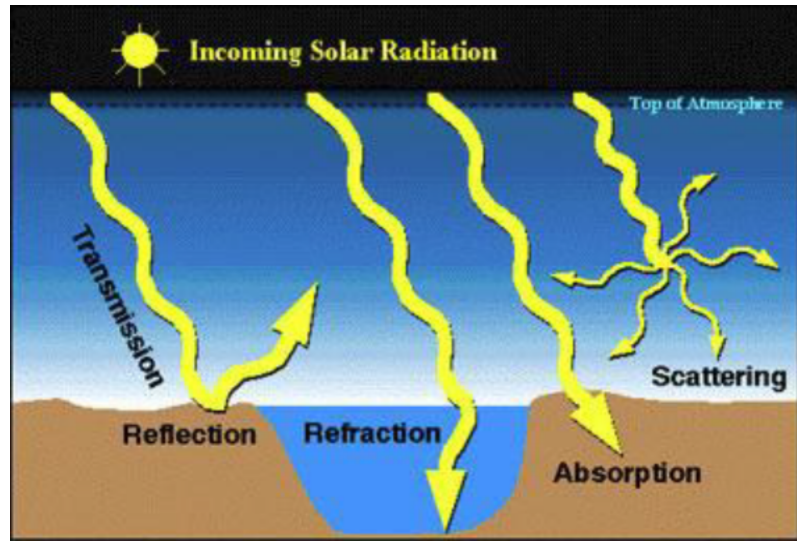


Figura 2.4: Possibili interazioni tra onda elettromagnetica e materia.

- **scattering/diffusione:** si verifica quando le particelle o molecole di gas presenti in atmosfera interagiscono con la radiazione provocando una diffusione dell'energia in direzioni diverse dal suo percorso originario. Il colore blu del cielo durante il giorno è causato da tale fenomeno.

E' importante sottolineare, infine, che il predominare della riflessione rispetto allo scattering dipende dalla rugosità della superficie rispetto alla lunghezza d'onda del campo elettromagnetico incidente.

2.2.1 La trasmissività atmosferica

Ogni molecola in atmosfera è caratterizzata da una propria banda di assorbimento dello spettro; solo le radiazioni aventi lunghezza d'onda che non cadono all'interno di queste bande possono essere utilizzate ai fini del telerilevamento. Come mostrato in fig. 2.5, Il blu evidenzia le zone di minima trasmissione mentre in bianco sono riportate le aree note come *finestre atmosferiche* in cui la radiazione ha una quantità ridotta di interazioni con le diverse specie molecolari, e può quindi attraversare l'aria con perdite minime o nulle dovute all'assorbimento.

Le finestre atmosferiche più note sono, oltre naturalmente a quella del visibile (400-700nm), quelle di 3-5 μm e 8-15 μm circa, relative all'infrarosso termico e quasi tutta la banda delle microonde. Nell'intervallo fra 5 e 7 μm circa, si assiste ad un forte fenomeno di assorbimento delle radiazioni da parte del vapore acqueo: per tale motivo questa regione viene utilizzata dai satelliti meteorologici per gli studi climatici.

Le microonde (λ da 1 cm a 1 m) sono, invece, utilizzate sia per il telerilevamento attivo che per quello passivo; grazie alla lunghezza d'onda che le caratterizzano, confrontate al visibile ed

all'infrarosso, godono di proprietà fondamentali per il telerilevamento. Possono, infatti, penetrare attraverso nuvole, polveri e forti precipitazioni, poiché non sono suscettibili alla diffusione atmosferica come lo sono le lunghezze d'onda più corte. Questa importante proprietà permette il rilevamento mediante l'uso delle microonde con qualsiasi condizione ambientale e di tempo.

La maggior parte dei sensori per il telerilevamento satellitare sono ovviamente progettati per operare in una o più finestre ed effettuano le misure impiegando dei *rilevatori* sintonizzati su tali finestre.

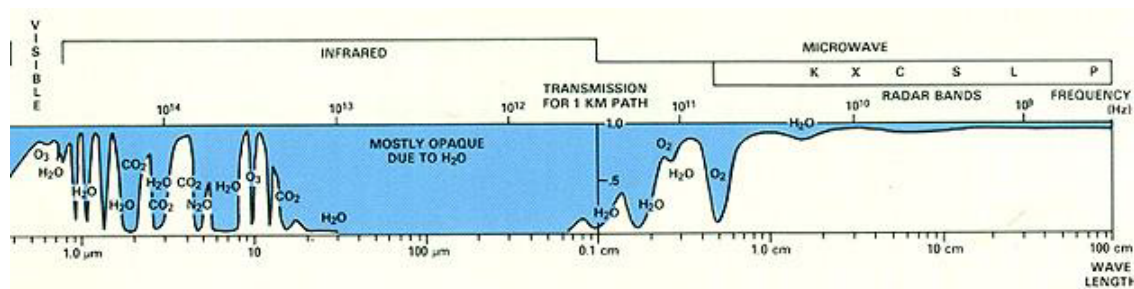


Figura 2.5: Le finestre atmosferiche.

2.2.2 Il corpo nero

Un ulteriore concetto importante per comprendere a fondo i principi fisici che regola la teoria del telerilevamento è quello di *corpo nero*. In fisica, un corpo nero è definito come un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica ad esso incidente senza rifletterla, ed è perciò detto comunemente nero secondo l'interpretazione classica del colore dei corpi.

Assorbendo tutta l'energia incidente, per la legge di conservazione dell'energia il corpo nero re-irradia tutta l'energia assorbita (coefficiente di emissione uguale a quello di assorbimento e pari a uno). Si tratta, naturalmente, di una idealizzazione fisica, dal momento che in natura non esistono corpi che soddisfano perfettamente tale caratteristica.

La radiazione che un corpo nero emette viene definita radiazione del corpo nero e la densità di energia irradiata spettro di corpo nero. Lo spettro (intensità o densità della radiazione emessa in funzione della lunghezza d'onda o della frequenza) di un corpo nero è uno spettro dalla caratteristica forma a campana (più o meno asimmetrica e più o meno schiacciata) dipendente unicamente dalla sua temperatura T e non dalla materia che lo compone. La differenza tra lo spettro di un oggetto reale (per esempio il sole) e quello di un corpo nero ideale permette di individuare la composizione chimica di tale oggetto (nel caso del sole, idrogeno ed elio). Tale analisi viene realizzata nell'ambito della spettroscopia.

La distribuzione di intensità della radiazione di un corpo nero alla temperatura T è esplicitata dalla **legge della radiazione di Planck**, la quale afferma che il sole si comporta come un radiatore perfetto (corpo nero) con temperatura circa di 5800K. L'energia emessa varia con la lunghezza d'onda, seguendo l'equazione di Planck:

$$M(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (2.1)$$

ove M (λ) è l'emissione spettrale, λ è la lunghezza d'onda della radiazione (m), h è la costante di Planck ($h = 6.626 \times 10^{-34}$ Js), c è la velocità della luce ($c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$), k è la costante Boltzmann ($k = 1.3807 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$) e T è la temperatura del corpo nero (K). Un'altra relazione correlata alla legge di Planck enuncia che l'emittanza di un corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della propria temperatura:

$$\frac{Q}{T} = e\sigma ST^4 \quad (2.2)$$

ove Q rappresenta il calore emesso nell'unità di tempo dalla superficie S alla temperatura T, e il potere emissivo della superficie ($0 \leq e \leq 1$), e $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$.

Infine, occorre utilizzare la cosiddetta legge dello spostamento o di Wien, formalizzata dal fisico tedesco Wilhelm Wien, che consente di individuare per quale lunghezza d'onda è massima l'emissione radiativa di un corpo nero di massa generica posto a una certa temperatura T. Essa enuncia che:

$$\lambda_{max} = \frac{2897}{T} \quad (2.3)$$

Dove λ_{max} è la lunghezza d'onda del picco espressa in μm , e T è la temperatura del corpo nero espressa in Kelvin. Dal momento che la temperatura media superficiale terrestre è di circa 287K, si ha lunghezza d'onda alla quale si ha il massimo è di circa $\lambda_{max} = 10 \mu m$ che corrisponde appunto allo spettro dell'infrarosso termico.

Capitolo 3

I sensori

I sensori impiegati nel telerilevamento si suddividono in due grandi gruppi:

- **Sensori attivi:** il sensore emette la radiazione (propria fonte di energia) che è diretta verso l'oggetto che deve essere osservato. La radiazione riflessa dall'oggetto è registrata e misurata dal sensore. Il gruppo dei sensori attivi è quello che oltre a registrare l'energia elettromagnetica proveniente dalle superfici, produce esso stesso l'energia necessaria per illuminare la scena da riprendere. Si pensi ad una macchina fotografica che utilizza il flash per attivare la scena da riprendere. Tipici sistemi attivi d'osservazione della terra sono il radar ed il lidar che inviano un fascio di radiazioni, e poi registrano il segnale di ritorno dopo che questo ha interagito, ed è perciò stato modificato, dalla superficie indagata. I vantaggi derivanti dall'utilizzo di tale tipologia di sensore sono la capacità di ottenere misure in ogni istante, senza problemi legati al momento del giorno o della stagione, e l'utilizzo di radiazioni di varie λ .
- **Sensori passivi:** gli strumenti che non emettono energia propria, ma sfruttano esclusivamente la radiazione naturale di altre sorgenti luminose sono definiti passivi; esempi di sensori passivi sono i radiometri, che misurano l'energia proveniente da sorgenti esterne (il sole nella banda del visibile, la terra nelle bande dell'infrarosso termico e delle microonde). Usando sempre l'esempio della macchina fotografica, quando questa opera senza flash si comporta come un sistema di rilevamento passivo.

Scendendo nel dettaglio, verranno ora descritte le principali metodologie di telerilevamento, differenziandole per banda spettrale di interesse e elencando caratteristiche e peculiarità di impiego di ognuna di esse.

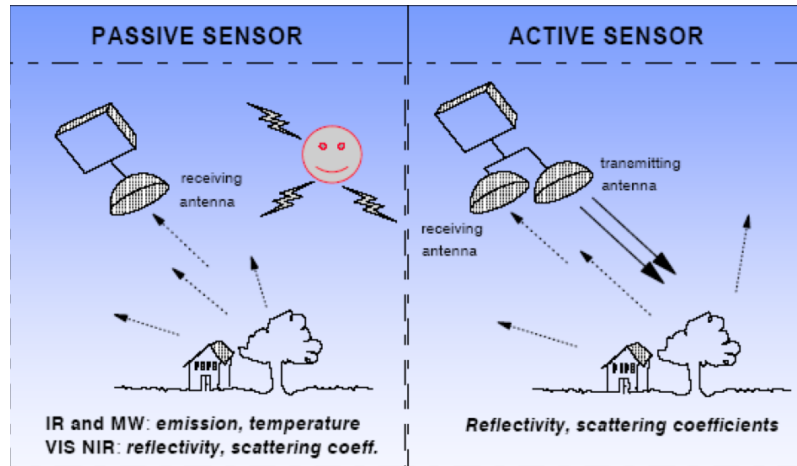


Figura 3.1: Rappresentazione grafica dei sensori attivi e passivi.

3.1 TLR nel visibile

I sensori ottici per il telerilevamento passivo che operano nel visibile o nell'infrarosso sono costituiti principalmente, da un sistema ottico di ripresa, da un sensore elettro-ottico e da un convertitore analogico digitale. Il sistema ottico ha la funzione di focalizzare la radiazione ricevuta dalla superficie osservata sulla superficie del sensore vero e proprio. Questo a sua volta è un sistema elettro-ottico che ha il compito di convertire la potenza elettromagnetica che lo investe in un segnale elettrico di caratteristiche opportune. Il segnale così ottenuto viene successivamente digitalizzato dal sistema di conversione analogico-digitale. Un tipico esempio di immagine nel visibile è illustrata dalla fig. 3.2, ove è rappresentata un'immagine della sede dello Stato del Vaticano, acquisita con il satellite Quickbird.

3.2 TLR nel vicino e medio infrarosso

In queste finestre spettrali, Il flusso radiante incidente è anche chiamato irradianza. Il flusso radiante riflesso si riferisce alla frazione di potenza riflessa globalmente, sia in forma speculare che diffusa. Gli strumenti che vengono utilizzati per misurare il flusso radiante spettrale proveniente dalla superficie terrestre vengono chiamati spettrometri, supponendo noto quello solare incidente, si ottiene la riflettanza $R(\lambda)$, che contiene le informazioni sulle proprietà della superficie stessa.

Il flusso radiante spettrale del sole che incide sulla superficie terrestre non è costante, ma dipende soprattutto dalla posizione angolare del sole e dalle condizioni meteorologiche (vapor d'acqua, nubi); i flussi radianti vanno quindi modificati attraverso opportune procedure di correzione atmosferica. Nelle bande del visibile e del NIR (Near Infrared) non vi è apprezzabile emissione termica

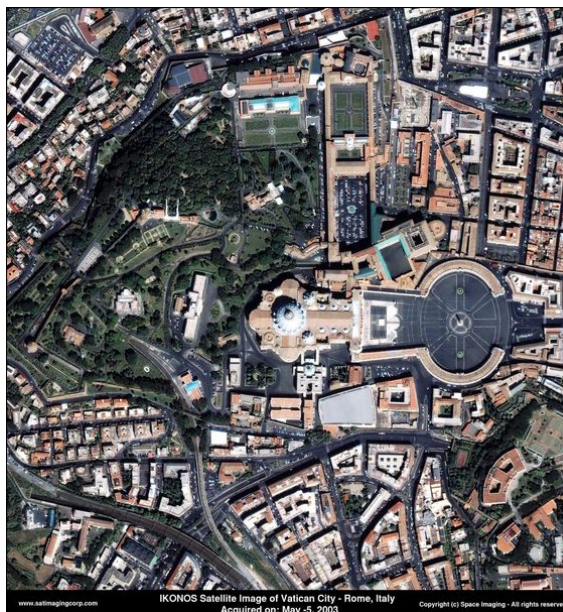


Figura 3.2: Immagine dello Stato del Vaticano telerilevata con satellite Ikonos.

da parte dei mezzi naturali, e si opera a lunghezza d'onda alle quali l'atmosfera è trasparente.

3.3 TLR nell'infrarosso termico

Nell'infrarosso termico, infine, il sensore esprime una misura della quantità di radiazione elettromagnetica emessa dalla superficie terrestre nelle lunghezze d'onda dai 3 ai 35 μm (a meno delle finestre di assorbimento dell'atmosfera). Viene identificato, quindi, lo status termico dell'oggetto osservato. La fig. 3.3 rappresenta una caratteristica immagine all'infrarosso termico ove le zone ad una temperatura maggiore sono associate a zone tendenti alla colorazione più chiara, viceversa le zone che si trovano ad una temperatura più bassa sono rappresentate da livelli di grigio più marcati e tendenti al nero. Il telerilevamento termico è molto importante per indagare sulla presenza di oggetti anche nascosti in quanto è in grado di mettere in evidenza, appunto, elevate differenze di temperature superficiali (Es. un mezzo con motore caldo nascosto nella foresta, ecc..). Si rivela, in definitiva, un ottima metodologia che trova impiego anche in applicazioni di sicurezza e intelligence.

3.4 TLR nelle microonde

Monitorare la Terra sia di giorno sia di notte e in qualunque condizione atmosferica è possibile grazie al telerilevamento nella banda spettrale delle microonde, tramite utilizzo di radar ad apertura sintetica (SAR). Essi sono dotati di un sistema trasmettente e uno ricevente mediante i quali,

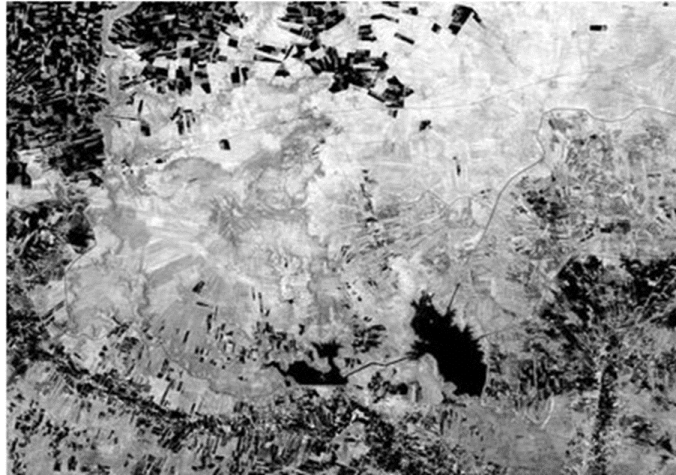


Figura 3.3: Immagine che mette in evidenza le differenze di temperature della scena osservata.

con l'invio di un opportuno segnale, *illuminan* la zona di interesse e registrano la radiazione elettromagnetica di ritorno.

Uno dei vantaggi di tali sistemi è la capacità di acquisire immagini sia di giorno sia di notte, anche quando il cielo è coperto da nuvole o dalla cenere emessa da un vulcano, data la capacità delle microonde (lunghezza d'onda compresa tra 1m e 1 mm) di attraversare le nubi. Ma la caratteristica più importante di queste tecniche è che permettono di misurare piccolissime deformazioni del suolo, anche dell'ordine del centimetro, e di seguire l'evoluzione temporale della deformazione.

3.5 Caratteristiche delle immagini satellitari radar, ottiche ed iperspettrali

I sensori per il telerilevamento forniscono un insieme di misure di radianza che vanno a comporre le immagini digitali che saranno oggetto dei processi di analisi ed elaborazione dei dati. Ogni sensore di telerilevamento è contraddistinto da una serie di parametri che influenzeranno il processo di elaborazione.

- **Risoluzione geometrica:** Ogni sensore per il telerilevamento è caratterizzato da una risoluzione spaziale, che rappresenta l'area al suolo corrispondente alla dimensione del *pixel* sull'immagine digitale e che viene definita in base alla geometria tra il sensore e l'obiettivo nella fase di misurazione. Il sensore rileva l'energia proveniente dall'area compresa nell'angolo solido sotteso e fornisce il valore registrato per unità elementare dell'immagine. Questa unità di superficie al suolo viene indicata con la sigla IFOV (*Instantaneous Field of View*) ed è funzione dell'altezza H del sensore, della dimensione D del detector e della lunghezza focale f

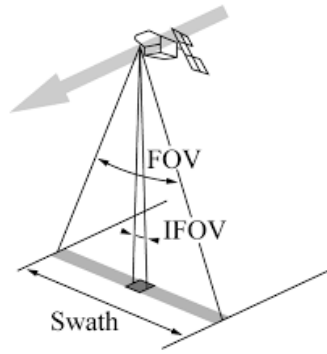


Figura 3.4: Rappresentazione esemplificativa del concetto di IFOV.

del sistema ottico impiegato. L'IFOV può essere espresso come angolo o direttamente come lunghezza:

$$IFOV_{\alpha} = \frac{D}{f} \quad (3.1)$$

dove α è l'angolo sotteso. L'apertura angolare complessiva entro la quale il sensore acquisisce il segnale è il campo di vista ed individuare l'ampiezza massima della scena di osservazione nella direzione perpendicolare alla rotta di volo. In fig. 3.4 è illustrato uno schema esemplificativo dell'acquisizione del segnale da parte del detector.

Per ottenere un'elevata risoluzione spaziale, l'IFOV dovrebbe essere molto piccolo: il limite è stabilito dalla quantità di energia in arrivo al sensore che, provenendo da una superficie al suolo piuttosto ridotta, condiziona la capacità del sensore di rilevare un segnale sufficientemente discriminabile dal rumore di fondo.

- **Risoluzione radiometrica:** esprime la capacità del sistema di rilevare variazioni di radianza nella scena osservata. Il segnale in uscita dal detector deriva dalla trasformazione di un segnale ottico analogico in un segnale elettrico digitale che associa un numero binario ad un livello (o tono) di grigio. La risoluzione radiometrica misura quindi il numero di livelli di grigio (range dinamico) impiegati per rappresentare i dati raccolti dal sensore. In generale, i sistemi di rilevamento sono progettati in modo da registrare il maggior numero possibili di livelli di segnale per ridurre al minimo la perdita di informazione relativa alla scena osservata, ma il limite superiore del range dinamico dello strumento è definito dal rapporto segnale/rumore.

La fig. 3.5 mette in relazione delle immagini ottenute con differenti risoluzione radiometriche.

- **Risoluzione spettrale:** la risoluzione spettrale di un sensore è determinata dall'ampiezza di

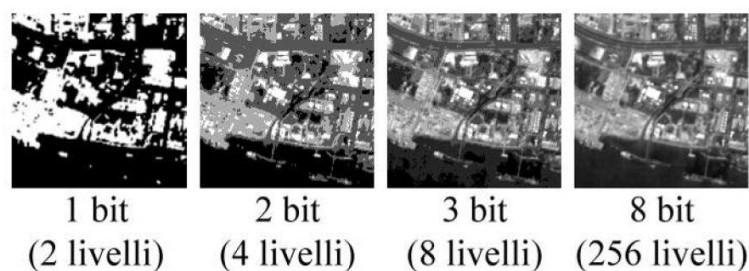


Figura 3.5: Esempio di immagine a diverse risoluzioni radiometriche.

banda (intervallo di lunghezza d'onda) che lo strumento riesce a discriminare. Esistono due tipi fondamentali di sensori remoti: i multispettrali, che registrano immagini in un limitato numero di bande spettrali distinti (di norma in numero inferiore a dieci), spesso ampie e non contigue, e gli iperspettrali, che acquisiscono il segnale in numerosi intervalli di lunghezze d'onda molto stretti e ravvicinati, e che quindi consentono di ottenere una risposta spettrale dettagliata dei diversi oggetti investigati.

Per fornire un'accurata identificazione degli obiettivi presenti al suolo la risoluzione spettrale del sensore deve essere confrontabile il più possibile con la curva di riflettanza dell'oggetto (firma spettrale). Il limite dei sistemi ad alta risoluzione è stabilito dal basso rapporto segnale/rumore in quanto la potenza raccolta dal sensore, a parità di radianza al suolo, è proporzionale all'ampiezza dell'intervallo di lunghezze d'onda in cui il segnale viene registrato. Questo problema può essere in parte essere compensato allungando i tempi di esposizione durante l'acquisizione dell'immagine.

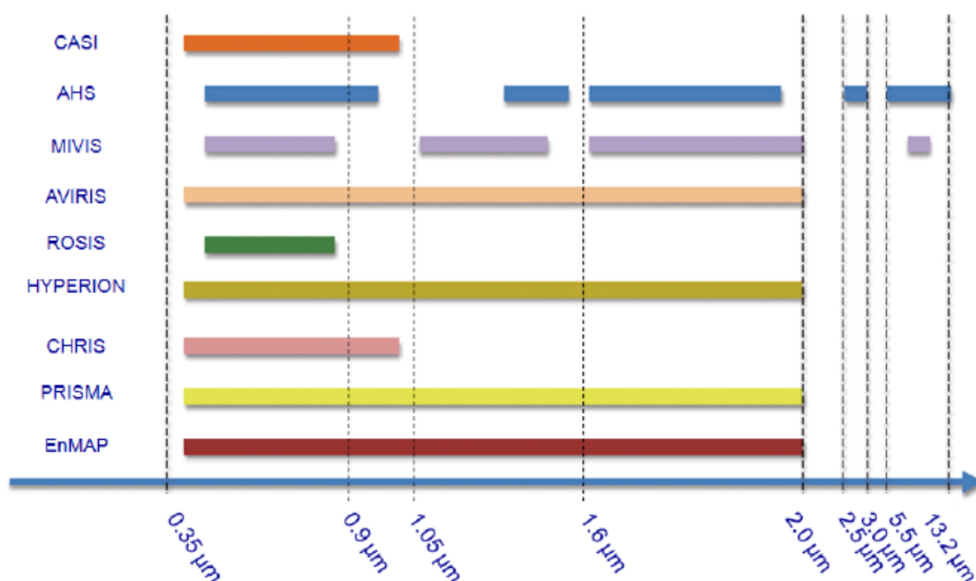


Figura 3.6: Rappresentazione delle bande dei principali satelliti multi-iper spettrali.

- **Risoluzione temporale:** dal punto di vista temporale, ogni campionamento si caratterizza per la durata del prelievo e per la frequenza con la quale si ripete. Nel caso dei sensori remoti, la durata dell'osservazione è condizionata dalle caratteristiche del sistema di osservazione (tempo ed esposizione) ed è generalmente trascurabile nei confronti dei tempi di evoluzione dei fenomeni di indagine. Lo studio di ambienti dinamici come quelli oggetto di questo elaborato, invece, richiede che il tempo impiegato per acquisire i dati sul territorio sotto osservazione sia quanto più breve possibile.

In linea generale, è opportuno sottolineare che la scelta del sensore da utilizzare per l'osservazione della scena deve essere guidata dallo scopo che si intende perseguire. Sensori di diversa natura, come visto nei punti precedenti, sono caratterizzati da differenti risoluzioni spaziali, geometriche, temporali e radiometriche, e ciò identifica notevoli differenze in termini di capacità prestazionali.

Pertanto, partendo dall'applicazione che si intende portare a termine, è opportuno individuare il sensore che maggiormente si attaglia alle richieste dell'applicativo in oggetto. Suddividere le applicazioni che si occupano di *analisi* (orientate alla pianificazione), *monitoraggio* (di un fenomeno o di un evento) e *stima* (di un evento o di un danno) può aiutare nella fase di scelta del sensore più opportuno.

Capitolo 4

La tecnologia dei sensori radar, ottica e iperspettrali

4.1 La missione Pr.IS.M.A

Il satellite **PRISMA**, acronimo di *PR*ecursore *I*perSpettrale della *M*issione *A*pplicativa, è un satellite italiano per l'osservazione della Terra. Lo scopo della missione è di testare un dimostratore tecnologico dotato di strumenti ottici per il monitoraggio delle risorse naturali e delle caratteristiche dell'atmosfera. Le principali applicazioni per le quali il satellite è stato concepito sono quelle di monitorare, appunto, i fenomeni geologici che avvengono in Italia, lo stato delle risorse naturali, la qualità dell'aria e i livelli di inquinamento. Il satellite è una missione dell'Agenzia Spaziale Italiana¹, il suo controllo sarà effettuato dal Centro spaziale del Fucino² in banda *S*, mentre le immagini da esso rilevate saranno scaricati in banda *X* ed elaborati presso il Centro di geodesia spaziale Giuseppe Colombo³ di Matera.

Il segmento di terra della missione PRISMA è geograficamente distribuito: il controllo del satellite (SCC) e la gestione della missione (MCC) saranno effettuati dalla stazione del Fucino, mentre i dati saranno scaricati, processati, catalogati ed archiviati presso il Centro Nazionale

¹L'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) è un ente governativo italiano, creato nel 1988, che ha il compito di predisporre e attuare la politica aerospaziale italiana. Dipende e utilizza i fondi ricevuti dal Governo italiano per finanziare il progetto, lo sviluppo e la gestione operativa di missioni spaziali, con obiettivi scientifici e applicativi.

²Il centro spaziale del Fucino, noto anche con il nome di Telespazio del Fucino, è il più grande teleporto al mondo per usi civili utilizzato per il controllo dei satelliti artificiali, per le telecomunicazioni, e per i servizi di rete hosting, televisivi e multimediali. Il centro spaziale, è gestito dalla Telespazio, azienda costituita da due joint venture, l'italiana Leonardo (Finmeccanica) e la francese Thales.

³Gli sforzi del centro si concentrano nell'osservazione della Terra per mezzo di tecnologie spaziali avanzate (geodesia spaziale e rilevazioni remote) e di metodi d'osservazione ad alta tecnologia (telemetria laser satellitare geodetica o SLR, radio-interferometro su lunga base o VLBI (a cui contribuisce tramite una parabola di 20 m), localizzazione GPS, tracciamento orbitale PRARE).

Multimissione (IDHS/CNM) dell'ASI di Matera. L'accesso ai prodotti e alle richieste di nuove acquisizione avverrà, previa registrazione, attraverso un portale unico. I prodotti standard della missione sono:

- **Livello 0:** RAW data riorganizzato per immagini base da 30x30 km (1000 linee x 1000 pixel iperspettrali)
- **Livello 1:** Top-of-Atmosphere radiometricamente e spettralmente corretta)
- **Livello 2:** Riflettanza superficiale corretta atmosfericamente e geometricamente. I dati di livello 2 possono essere geocodificati con GCP e con DEM.

La ricerca scientifica e le applicazioni di osservazione della Terra potranno usufruire dei dati della missione PRISMA per sviluppare algoritmi e prodotti innovativi. Potrà inoltre dare un contributo all'osservazione da satellite delle risorse naturali e allo studio dei principali processi ambientali (interazione tra atmosfera, biosfera e idrosfera; osservazione dei cambiamenti dell'ambiente e del clima a livello globale; effetti delle attività antropiche sugli ecosistemi).

Il team industriale della missione PRISMA è costituito da un consorzio di industrie italiane guidato da OHB Italia SPA e da Leonardo SPA, Divisione Sistemi Avionici e Spaziali (RTI) con i principali attori del settore aerospaziale italiano (TAS-I, Telespazio, ACS, Planetek Italia, TEchno Developments, TEMIS, DTM).

4.1.1 Caratteristiche e prestazioni

Il satellite PRISMA è dotato di un sensore ottico Iperspettrale di nuova generazione, associato ad una camera pancromatica. Potrà quindi acquisire globalmente immagini della superficie terrestre da un'orbita LEO (Low Earth Orbit) eliosincrona ⁴, ad una quota di circa 615km.

Lo strumento a bordo del satellite PRISMA è basato su tecnologia di acquisizione di tipo **pushbroom** e fornirà immagini iperspettrali (VNIR-SWIR) con risoluzione spaziale al nadir di 30 m, insieme ad immagini Pancromatiche con risoluzione di 5 m.

⁴Si dice eliosincrona (sun-sincrona) un'orbita geocentrica che combina altezza e inclinazione in modo tale che un oggetto posto su quest'orbita, sorvoli ogni dato punto della superficie terrestre sempre alla stessa ora solare locale. In questo modo l'illuminazione solare sulla superficie terrestre risulta essere la stessa per ogni rivoluzione, cosa che aiuta l'osservazione essendo le condizioni di luce grosso modo invariate orbita dopo orbita.

Orbita	SSO 615km 10:30 LTDN
Relook time	7 giorni
Area di interesse	70° Nord + 70° Sud
Capacità Off-nadir	+/- 21° across track
Onboard Data Storage	448 Gbit
Downlink data rate	310 Mbps
Capacità di imaging	200.000 km ² , pushbroom, strip ≤1800km
Potenza Payload	450 W
Massa	800 kg
Capacità Sistema di Propulsione	118 $\frac{m}{s}$
Latenza di processamento	< 2 giorni
Pointing accuracy	< 1 km

E' inoltre caratterizzato da alte prestazioni radiometriche in termini di rapporto segnale-rumore (SNR) e da una risoluzione spettrale molto elevata.

Swath	30 km / 2.77°
GSD (@ Nadir)	HYP: 30m PAN: 5m
Spatial Pixels	HYP: 1000 PAN: 6000
Pixel Size	HYP: 30x30 μ m, PAN:6.5x6.5 μ m
Spectral Range	VNIR: 400-1010nm (66 bande); SWIR: 920-2500nm (173 bande); PAN: 400-700nm
Spectral Sampling Interval	≤12nm
Spectral Width	≤12nm
Radiometric Quantization	12 bit
VNIR SNR	>200
SWIR SNR	>100
PAN SNR	>240
Absolute Radiometric Accuracy	5%
Cooling System	Passive Radiator

In aggiunta, il satellite avrà la capacità di acquisire globalmente dati (PAN e canali iperspettrali) per un totale giornaliero di 200000 km². La modalità primaria di acquisizione sarà basata sulle richieste dell'utente, mentre la modalità secondaria seguirà un piano di background della missione.

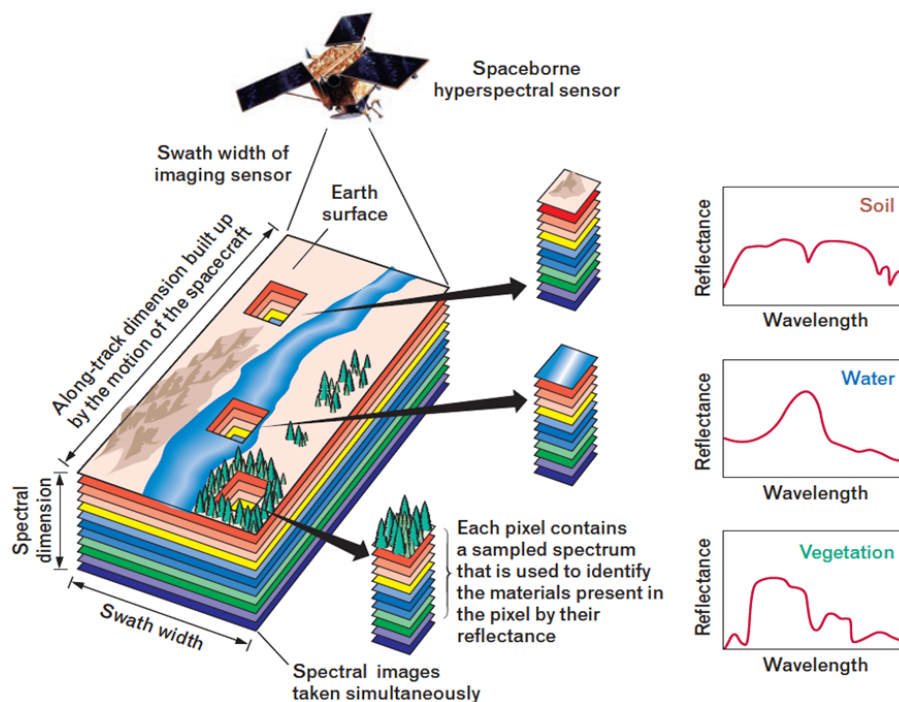


Figura 4.1: Rappresentazione grafica di un cubo di dati iperspettrali.

La manovrabilità del satellite consentirà acquisizioni nell'intero *Field of View* dello strumento ($-21^\circ/+21^\circ$), per una porzione della traccia a terra lungo l'orbita inferiore a 1000km.

4.1.2 Le immagini iperspettrali

Il *Multi e Hyperspectral Imaging* appartengono entrambi ad una più grande famiglia di tecniche di rappresentazione delle immagini detta **Spectral Imaging** o **Spectral Analysis**.

In particolare, le immagini multispettrali hanno rappresentato fino ad oggi la principale categoria di immagini acquisite dai sensori di telerilevamento. A differenza delle immagini pancromatiche, che per ogni pixel memorizzano un solo valore, le immagini multispettrali suddividono lo spettro elettromagnetico in tante bande (o canali), e assegnano ad ogni pixel un valore appartenente a tali bande.

Le immagini multispettrali sono state concepite con lo scopo di memorizzare un maggior numero di informazioni rispetto alle immagini pancromatiche, estendendo le informazioni archiviate nei singoli canali *RGB*. I primi impieghi di queste immagini hanno avuto luogo in campo spaziale e archeologico, per lo studio di reperti e documenti, altrimenti non analizzabili ad occhio nudo.

Nelle immagini iperspettrali, così come accade in quelle multispettrali, ogni elemento dell'immagine (pixel) non è costituito da un semplice valore monocromatico (immagini pancromatiche o

in scala di grigio), o da una terna di valori (immagini a colori RGB), ma da un insieme di valori appartenenti allo spettro elettromagnetico.

La distinzione tra immagini multispettrali e immagini iperspettrali si basa principalmente sul numero di bande che vengono memorizzate, e sullo spettro di frequenze rappresentato. In particolare, le prime possiedono un numero limitato di bande e spesso non memorizzano bande di frequenze contigue. Ovvero è possibile che all'interno di una stessa immagine vi siano alcune bande relative allo spettro del visibile, ed altre bande relative a quello degli infrarossi, e che lo spazio di frequenze tra di esse non sia totalmente coperto dalle restanti bande.

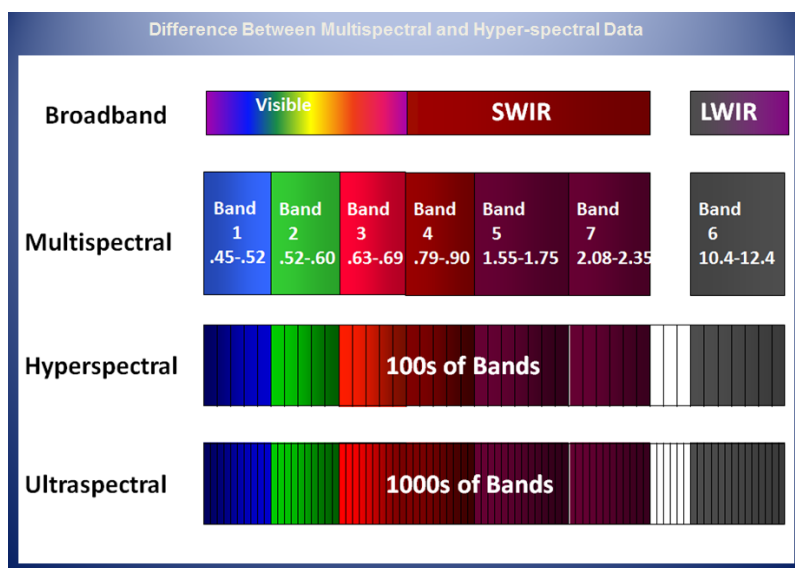


Figura 4.2: Illustrazione del numero di bande delle tecniche multi-iper-ultra spettrale

Le immagini iperspettrali, viceversa, racchiudono un numero elevato di bande le quali rappresentano intervalli discreti dello spettro elettromagnetico, e producono uno spettro continuo per ogni pixel ritratto nella scena.

Un'immagine iperspettrale può dunque essere considerata come un cubo di dati, costituito da tanti piani quante sono le bande che compongono lo spettro telerilevato, e di larghezza e altezza pari alle dimensioni dell'area catturata. Idealmente è possibile considerare le due dimensioni spaziali come se fossero appoggiate sulla superficie ritratta e la terza dimensione (spettrale) perpendicolare ad esse (vedi Fig. 4.1). Se ci si sposta lungo la direzione spettrale, si ottengono valori e colorazioni diverse, e se si preleva una delle bande telerilevate, si ottiene un'immagine monocromatica. Prelevando le informazioni relative ad un singolo punto dell'immagine, si ottiene lo spettro continuo di quel determinato pixel. Spesso lo spettro associato a ciascun pixel è uno **spettro di riflettanza**, che può contenere fino a qualche centinaio di valori monocromatici. La riflettanza, come esposto nei capitoli precedenti, è un numero puro, compreso tra 0 e 1, che rappresenta l'efficienza con la

quale una superficie riesce a riflettere la luce di una data lunghezza d'onda.

La fig. 4.2 mostra le differenze concettuali che sussistono tra la classificazione multispettrale, iperspettrale ed ultraspettrale (ancora non utilizzato). Nel primo caso, come mostrato, lo spettro elettromagnetico dal visibile al LWIR è suddiviso in un esiguo numero di bande; il sensore quindi è caratterizzato da una risoluzione spettrale non particolarmente elevata. L'iperspettrale, viceversa, vede lo spettro di interesse frammentato in un numero di circa 200-250 sottobande. L'ultraspettrale suddivide ulteriormente le sottobande in diverse centinaia di bande, con una risoluzione spettrale ancor più elevata (ma attualmente non utilizzato).

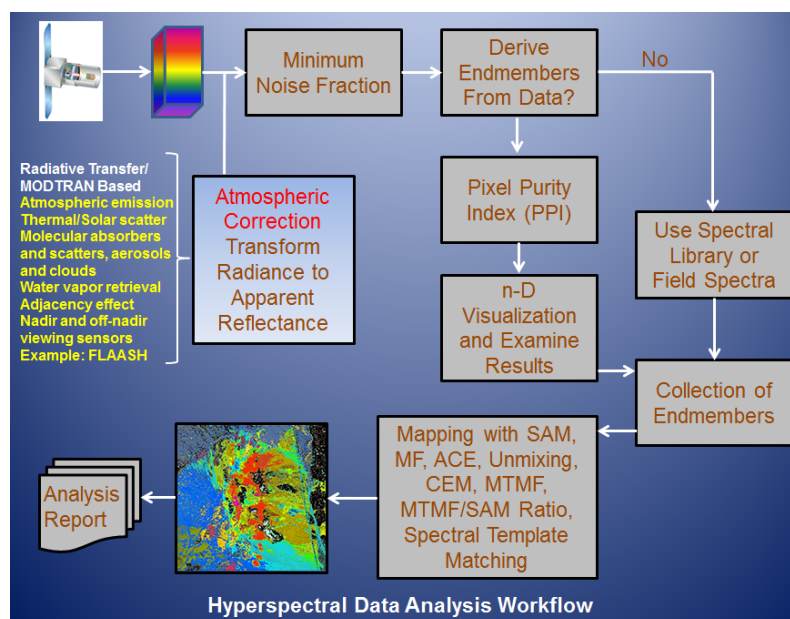


Figura 4.3: Flusso elaborativo di un'immagine iperspettrale.

La fig. 4.3, invece, descrive il flusso elaborativo di una generica immagine iperspettrale. Dalla fase di acquisizione dell'immagine da parte del sensore iperspettrale si passa ad una prima fase di pre-processamento, ove vengono effettuati le correzioni dei disturbi introdotti dall'atmosfera. Successivamente l'immagine viene elaborata al livello dei singoli pixel; i risultati dell'elaborazione vengono collezionati in un report; il processo di elaborazione verrà dettagliato nel seguito della trattazione.

4.2 COSMO-SkyMed

COSMO-SkyMed (*C*Onstellation of small *S*atellites for *M*editerranean basin *O*bservation) è il primo sistema duale (civile e militare) di satelliti radar di osservazione terrestre; il sistema è promosso dall'Agenzia Spaziale Italiana e dal Ministero della Difesa. Esso rappresenta la componente ita-

liana di un sistema italo-francese risultato di un accordo intergovernativo bilaterale Italia-Francia siglato nel 2001 (Accordo di Torino) e ratificato con la Legge 10 gennaio 2004, n. 20; nella sua configurazione finale, il sistema bilaterale ORFEO disporrà di 4 satelliti radar italiani in banda X (COSMO-SkyMed) e di 2 satelliti ottici francesi (Pleiades), aumentando, quindi, le capacità complessive.

Inoltre, CSK è la componente italiana (national contributing mission) del sistema europeo Copernicus ed è censito fra le fonti di dati dell'iniziativa europea INSPIRE. COSMO-SkyMed è stato realizzato dall'azienda italiana Thales Alenia Space per conto dell'Agenzia Spaziale Italiana. Il primo satellite della costellazione, detto COSMO SkyMed 1, è stato lanciato il 7 giugno 2007 dalla base californiana di Vandenberg, alle 19:35 locali (le 4:35 in Italia), con il vettore Boeing Delta II. Il secondo satellite, detto COSMO SkyMed 2, invece, è stato lanciato il 9 dicembre 2007 dalla stessa base alle 03:31 ora italiana, con il medesimo vettore del COSMO SkyMed 1. Il suo segnale è stato acquisito un'ora e 5 minuti dopo il lancio e viene ricevuto dalla stazione di Terra del Fucino, gestita da Telespazio. Il terzo satellite della serie, COSMO SKyMed 3, è stato lanciato con successo il 25 ottobre 2008 dalla base di Vandenberg. Il quarto satellite della serie, COSMO SKyMed 4, è stato lanciato con successo il 5 novembre 2010 dalla base di Vandenberg.

Le sue immagini radar di alcune delle più gravi catastrofi naturali del 2008, come il ciclone Nargis in Birmania, il terremoto in Cina e gli uragani Hannah e Ike su Haiti, sono state utilizzate dalle Nazioni Unite e dalle organizzazioni umanitarie impegnate negli aiuti alla popolazione. Questi sono solo alcuni esempi delle eccezionali capacità operative di Cosmo SkyMed, il più ambizioso programma di osservazione satellitare terrestre mai realizzato dall'Italia per la prevenzione dei disastri ambientali, per lo studio della superficie terrestre e per la sicurezza.

Cosmo SkyMed è il primo sistema di osservazione satellitare della Terra concepito per scopi duali, cioè civili e militari. I suoi quattro satelliti sono quattro "occhi" in grado di scrutare la Terra dallo spazio metro per metro, di giorno e di notte, con ogni condizione meteo. Per aiutare a prevedere frane e alluvioni, a coordinare i soccorsi in caso di terremoti o incendi, a controllare dall'alto le aree di crisi.

Il sistema è in grado di effettuare fino a 450 riprese al giorno della superficie terrestre, pari a 1.800 immagini radar, ogni 24 ore. Il vero punto di forza di COSMO-SkyMed è la straordinaria flessibilità di utilizzo. L'occhio del radar può operare in modalità spotlight (concentrandosi su un'area di pochi km quadrati, e osservandola con risoluzione fino al singolo metro), stripmap (osservando una striscia continua di superficie terrestre) o scanSAR (coprendo una regione di 200 km di lato). Brevissimi sono anche i tempi di risposta, cioè il tempo necessario per configurare

la costellazione in modo da ottenere immagini dell'area desiderata: da 72 ore quando si opera in condizioni di routine, fino a meno di 18 ore in condizioni di emergenza.

Altro punto di forza è il breve tempo di rivista (l'intervallo tra due passaggi sullo stesso punto), inferiore alle 12 ore, che consente di monitorare costantemente l'evoluzione della situazione in una particolare area. Attualmente, nessun sistema satellitare può vantare caratteristiche così avanzate. La realizzazione di COSMO-SkyMed ha già consentito all'Italia importanti accordi internazionali nel campo dell'osservazione della Terra nell'ambito militare e civile, in particolare con la Francia e con l'Argentina. Con quest'ultimo paese l'Agenzia Spaziale Italiana ha in corso una collaborazione nel settore civile per la realizzazione del sistema SIASGE, Sistema Italo-Argentino di Satelliti per la Gestione delle Emergenze, nato nel 2005 da un accordo tra l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e la sua omologa argentina (CONAE)

4.2.1 Caratteristiche e prestazioni

Le principali caratteristiche tecniche della costellazione sono riepilogate nella tabella di seguito:

Sar Payload	X-band
Wet mass @ launch	< 1900 kg
Attitude Stabilization	3 axes
Right/left looking Capability	YES
DC power	3.8 kw @42v
SAR tX power	5 kW
Navigation and time Reference	gpS
Imaging Capability	multimode
Down-link data Rate	310 mbps
On-board memory	320 gbit
Number of Satellites	4
Orbit Height	619,6km
Inclination	97,86°
Period	100 minutes
Eccentricity	0.00118

Infine, le modalità operative possono schematizzarsi come segue:

- **SPOTLIGHT MODE** enHAnCed SpotligHt (finalizzata all'acquisizione di circa 60 immagini al giorno) con risoluzione di 1m e dimensione dello spot pari a 10x10km;

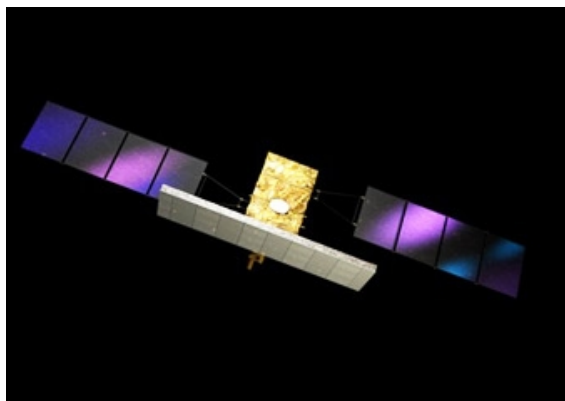


Figura 4.4: Immagine illustrativa di un satellite della costellazione COSMO-SkyMed

- **STRIPMAP MODE** HIMAGE (copertura continua) con risoluzione dai 3-5m e una dimensione a terra dell'immagine radar pari a 40X40 km; PINGPONG (copertura continua a due Polarizzazioni alternate tra: HH, VV, HV, VH) con risoluzione di 15m / doppia polarizzazione e dimensione traccia a terra di 30x30 km;
- **SCANSAR MODE** WIDEREGION (3 beams con copertura continua) con risoluzione di 30m e dimensione immagine pari a 100x100 km; in alternativa HUGEREGION (5 beams con copertura continua) avente risoluzione di 100m e dimensione traccia di 200x200 km.

4.3 OPTSAT-3000

OPTSAT-3000 è un programma satellitare per l'osservazione della Terra del Ministero della Difesa italiano. Il sistema è composto da un satellite ottico ad alta risoluzione e da un segmento di terra per il controllo in orbita, la pianificazione delle acquisizioni, l'acquisizione e il processamento delle immagini.

OPTSAT-3000 consente alla Difesa, agenzie governative italiane e partner internazionali che hanno sottoscritto accordi di cooperazione con la Difesa italiana, di poter disporre di immagini ad alta risoluzione di ogni punto della Terra.

Il sistema OPTSAT-3000 è stato fornito da Telespazio in qualità di primo contraente. La società, in particolare, è responsabile della fornitura dell'intero sistema: dal satellite al segmento di terra, dai servizi di lancio e messa in orbita, alla preparazione ed esecuzione delle attività operative e logistiche, fino alle fasi di test in orbita e commissioning.

La realizzazione del satellite è stata affidata alla società *Israel Aerospace Industries (IAI)*, selezionata dal Ministero della Difesa italiano sulla base di accordi intergovernativi italo-israeliani. La società OHB Italia è responsabile dei servizi di lancio e del relativo supporto ingegneristico.



Figura 4.5: Il satellite OPTSAT-3000 durante i test in camera bianca.

4.3.1 Caratteristiche e prestazioni

Il satellite OPTSAT-3000 è un sistema ad alta autonomia stabilizzato a tre assi, progettato per avere un peso ridotto, basso consumo, e alta affidabilità. Tra le principali caratteristiche del satellite sono da citare:

- altissima risoluzione;
- alta precisione di geolocalizzazione (localizzazione delle immagini su sistema di riferimento a terra);
- alta agilità, grazie al peso (400kg) e alle dimensioni compatte del satellite che producono una bassa inerzia, che permette l'acquisizione di un numero molto elevato di immagini, su aree diffuse, in un solo passaggio del satellite;
- progettato per una vita operativa di oltre sette anni.

Il Segmento di Terra per la gestione in orbita del satellite, per la pianificazione delle acquisizioni e per l'elaborazione delle immagini è dispiegato presso tre siti operativi: il Centro Spaziale del Fucino di Telespazio; il Centro Interforze di Telerilevamento Satellitare (CITS) di Pratica di Mare e il Centro Interforze Gestione e Controllo (CIGC) di Vigna di Valle della Difesa.

Capitolo 5

L'uso duale della tecnologia radar, ottica ed iperspettrale nella sorveglianza marittima

Come spiegato nel capitolo precedente, la missione PRISMA costituirà una componente innovativa nel campo del telerilevamento satellitare iperspettrale, in quanto sarà il primo satellite del suo genere in Italia ed Europa ad essere operativo. In tale scenario, lo studio che si pone alla base della presente trattazione è stato quello di indagare su possibili applicazioni di interesse sia militare che civile (applicazioni duali) derivanti dalla disponibilità di immagini satellitari di PRISMA.

Nell'ambito delle molteplici attività che potranno beneficiare dalle immagini iperspettrali, questo studio ha approfondito il tema della sorveglianza marittima. Più nello specifico, sono state anche analizzate le modalità e le possibilità di integrazione di immagini radar della costellazione Cosmo-Sky-Med e quelle, appunto, del nuovo PRISMA.

Il monitoraggio dell'attività umana nei mari è da sempre, e lo è diventato ancor più negli ultimi anni a causa del crescente numero di attività che avvengono nelle acque, un argomento di interesse comune a moltissimi stati. La pesca, la trivellazione, il trasporto passeggeri e merci, il turismo, sono solo alcune delle attività coinvolte; motivo per il quale l'interesse per un'efficace sorveglianza marittima è diventato sempre più importante e fondamentale. A conferma di ciò, si stima che circa l'80% delle merci a livello globale venga trasportato, nel suo percorso a partire dalla produzione al consumo, via mare, e ciò accresce in modo significativo le possibilità al traffico illecito di droga, armi e altro materiale fuori legge.

Esistono diversi sistemi che contribuiscono alla raccolta di informazioni riguardo la presenza, la posizione e le attività delle imbarcazioni in mare. Primo tra tutti, vi è il **Sistema di Autenticazione Autonoma** (in inglese (*Automatic Identification System - AIS*)), che è un transponder utilizzato, in ausilio ai sistemi radar, allo scopo di evitare le collisioni fra le unità in navigazione. Lo scopo dell'AIS è, inoltre, quello fornire una serie di informazioni sulle navi presenti nelle immediate vicinanze. Queste comprendono principalmente l'identificazione, il tipo di unità, la posizione, la rotta, la velocità. Tali dati possono essere visualizzate su schermo e usate dal sistema di pilotaggio per dare un allarme in caso di rotta di collisione. I dati trasmessi consentono, in aggiunta, alle autorità marittime di monitorare la presenza, rotta e posizione delle imbarcazioni.

Nonostante questo ed altri sistemi quali il *Vessel Monitoring System* introdotti dalla Organizzazione Marittima Internazionale (*International Maritime Organization - IMO*) siano strumenti efficaci, non danno un'immagine completa ed esaustiva di quello che accade realmente in mare. La maggior parte di piccole navi (<300 tonnellate) non hanno infatti l'obbligo di utilizzare tali sistemi e risultano, quindi, di difficile tracciabilità alle autorità. Inoltre, è stato dimostrato che alcune imbarcazioni che operano illegalmente nel campo della pesca, ad esempio, spengono o disturbano intenzionalmente gli apparati che comunicano la propria posizione.

E' facile intuire, quindi, che avere un controllo preciso, puntuale e soprattutto globale della situazione marittima risulta alquanto ambizioso; in questo scenario il telerilevamento satellitare svolge un ruolo importante. I sensori per la sorveglianza marittima spaziano dall'ottico al radar, dal multispettrale all'iperspettrale: ciascuno di essi presenta dei punti di forza e delle debolezze, in quanto sono caratterizzati da performance (risoluzione spaziale, geometrica, radiometrica, tempi di rivisitazione, copertura e costi) estremamente eterogenee tra loro.

Il telerilevamento satellitare offre la capacità di controllo remoto, copertura globale, update regolari e la raccolta di grandissime quantità di dati, e in alcuni scenari rappresenta l'unica possibile fonte di informazioni e/o la più economica. Per tali ragioni, l'uso di immagini satellitari in generale costituisce un essenziale strumento per la sorveglianza marittima.

Storicamente, l'utilizzo di sistemi radar (*Synthetic Aperture Radar SAR*) è divenuto molto popolare nel campo della *maritime surveillance*: le navi vengono riconosciute in modo abbastanza chiaro, indipendentemente dalla presenza di nuvoli o altri agenti atmosferici. Tuttavia, l'interesse nello studio delle potenzialità di immagini ottiche/iperspettrali è esponenzialmente cresciuto negli ultimi anni, probabilmente in primo luogo grazie alla sempre più ampia disponibilità di tale tipo di immagini.

Soffermandoci sul tema dell'analisi delle immagini, è importante sottolineare che il riconosci-

mento di oggetti nel telerilevamento è stato uno dei topic sui quali la ricerca si è maggiormente focalizzata di recente. Esistono, in letteratura, numerosi esempi di tecniche e algoritmi di riconoscimento automatico di oggetti applicabili nel campo della geografia, del controllo di infrastrutture, della sicurezza, etc. Analogamente, si avverte la crescente necessità di sviluppare nuovi metodi analitici automatici di riconoscimento delle navi, dal momento che aumenta sempre più la disponibilità di dati e immagini, la loro dimensione (anche terabyte) e complessità.

Il riconoscimento delle navi o di piccole imbarcazione rappresenta un piccolo sottoinsieme delle tematiche citate, ove si ha l'enorme vantaggio che lo sfondo è una superficie uniforme ovvero il mare. E' importante sottolineare che il processo di "riconoscimento" viene spesso usato in letteratura con un'accezione alquanto limitata; tale processo, invece, va inteso come un ampio spettro al quale fanno capo le seguenti fasi:

1. **Rinascimento (in senso stretto):** localizzare l'imbarcazione con delle coordinate;
2. **Classificazione:** discriminare le imbarcazioni riconosciute nella fase precedente in navi/non-navi e classificarne la natura (es. cargo, navi militari, navi da pesca)
3. **Identificazione:** stabilire l'identità della imbarcazione classificata (secondo la IMO o altri sistemi).

Considerando che la flotta mondiale ammonta a più di 87.000 navi e che soltanto in uno scenario in cui si hanno a disposizione delle informazioni a-priori, è pressochè impossibile procedere all'identificazione di una nave attraverso lo studio di immagini satellitari. Per questo, la presente trattazione si concentrerà soltanto sulle fasi del riconoscimento e della classifica.

5.1 Identificazione del target con sensore ottico

Il riconoscimento di imbarcazioni con l'utilizzo di un sensore di natura ottica può essere semplicemente considerato come un problema di identificazione di punti più chiari rispetto allo sfondo scuro del mare; nella realtà, tuttavia, disegna uno scenario molto più complicato. Può succedere, infatti, che le navi appaiano più scure della superficie marina circostante e che vi siano altri punti chiari dell'immagine che non siano, però, rappresentativi di una nave e che pertanto, adottando tale semplicistica soluzione, potrebbero dare luogo a falsi positivi.

Per tali motivi, il riconoscimento di imbarcazioni tramite sensori ottici merita una più approfondita analisi basata su pochi step illustrati in fig. 5.1.

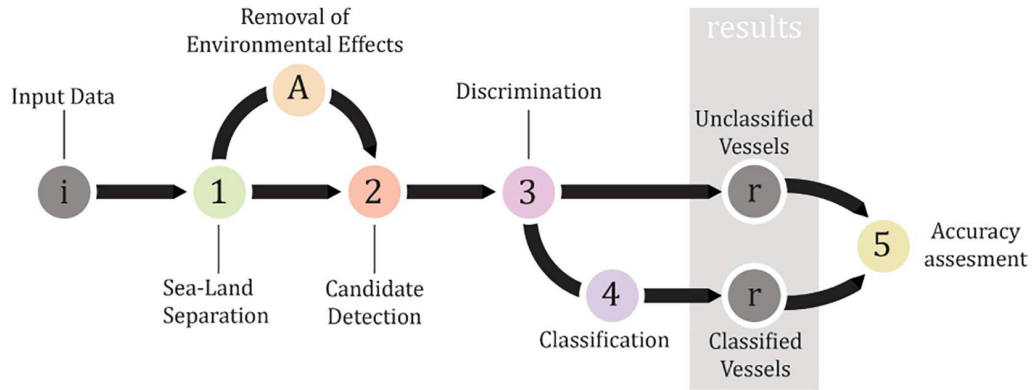


Figura 5.1: Flowchart del riconoscimento di imbarcazioni tramite sensori ottici.

5.1.1 Land-masking

La prima operazione da compiere consiste nel riconoscere e rimuovere dall'immagine tutte le parti terrestri, così da ignorare tali porzione nelle successive fasi elaborative. Tale fase, nota come *land masking*, è molto importante non solo per ottenere un'accurato tasso di riconoscimento delle imbarcazioni nelle vicinanze di porti, ma è altresì cruciale in quanto può portare, qualora non effettuata correttamente, a un alto numero di falsi positivi. La fase di land-masking può essere effettuata sostanzialmente in 2 modi: importando una maschera esterna o creando la propria maschera. Dati che descrivono i litorali, ovvero la linea che separa il mare dalla terraferma, sono disponibili e ad alta risoluzione consultando gratuitamente online il *Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography* (GSHHG).

Nel caso in cui si voglia procedere con il primo metodo, si può utilizzare un metodo chiamato Otsu. L'acqua ha un bassissimo indice di riflettanza e, pertanto, può essere facilmente rimossa con discreta precisione. Questo metodo è semplice e veloce, specie se immagini ad alta risoluzione vengono in primo luogo sottocampionate e poi elaborate. Ad ogni modo, la procedura può portare ad alcuni errori quali la non completa rimozione di zone di terra o alla rimozione di zone di mare. Per migliorarlo, esistono diverse tecniche quali, ad esempio, la *Digital Terrain Elevaton Data* (DTED) [1].

5.1.2 Rimozione o mitigazione di effetti atmosferici

La presenza di effetti atmosferici nelle immagini ottiche è generalmente un effetto indesiderato ma inevitabile. I fattori ambientali che principalmente influenzano negativamente e determinano una minore accuratezza nella fase di riconoscimento delle navi sono le onde, la copertura nuvolosa e la riflessione dei raggi solari sulla superficie del mare (sunglint). E' stato dimostrato che la presenza di tali effetti riduce drasticamente l'accuratezza, ad esempio, passando da un mare calmo a un mare

agitato. Tuttavia, questi errori possono ridotti adottando degli opportuni algoritmi di candidatura delle imbarcazioni.

- **le onde:** le onde hanno differente lunghezza, altezza e forma, risultando in una grande eterogeneità di pattern di propagazione. Le onde generano delle variazioni nei valori dei pixel delle immagini per due effetti principali: (a) le parti curve delle onde riflettono differenti valori di luce solare, e (b) le creste creano degli spike particolarmente luminosi. Il mare calmo rappresenta evidentemente la situazione ideale dal punto di vista computazionale, dal momento che sia navi grandi che piccole sono possono essere riconosciuta con una discreta precisione.

Per questo, un algoritmo che offre determinate prestazioni in caso di mare calmo, può mostrarsi estremamente inefficiente nell'analisi di un mare molto mosso nel quale le onde variano da centimetri a metri in termini di altezza e lunghezza. Per gli algoritmi di *vessel detection*, in definitiva, la presenza di onde irregolari costituisce un serio problema poichè determina grandi variazioni di indice di riflettività dello sfondo (clutter).

L'intensità del clutter, infatti, è generalmente proporzionale alla forza del vento e all'agitazione del mare, significando che è più difficile ottenere un riconoscimento attendibile mantenendo sufficientemente basso, al tempo stesso, il numero di falsi positivi. In aggiunta, lo sforzo computazionale aumenta drasticamente a causa del grande numero di target da dover processare nelle fasi di discriminazione.

Nonostante non sia semplice aumentare le performance e la corretta discriminazione delle onde, esistono delle metodologie che consentono di ottenere buoni risultati andando a analizzare se la superficie del mare è omogenea. [2].

- **le nuvole:** la copertura nuvolosa rappresenta un'altra fonte indesiderata di disturbo per le applicazioni di sorveglianza marittima e di riconoscimento delle imbarcazioni in mare. Una scena coperta da nuvole conduce a errori di mancato riconoscimento di navi e, viceversa, piccole nubi possono essere interpretate nella fase di elaborazioni quali navi e quindi come dei falsi positivi, da rimuovere nella fase di classificazione. Tuttavia, alcune immagini sono rilasciate con delle opportune maschere (come i prodotti di Sentinel-2 Level 1-C).

La rimozione delle nuvole viene generalmente effettuata con delle tecniche di *thresholding*, in quanto le nuvole hanno un alto indice di riflettanza in tutte le bande e sono pertanto facilmente individuabili e pertanto eliminabili. Altre tecniche utilizzano un algoritmo basato

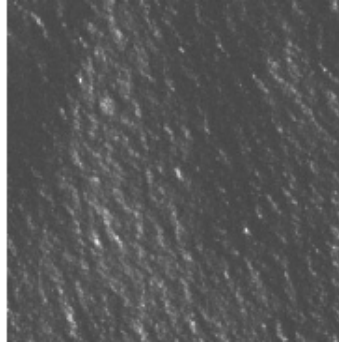


Figura 5.2: Esempio della influenza negativa delle creste d'onda del mare.

sulla trasformata di Fourier, dal momento che la presenza di nubi determina un picco nella zona centrale della trasformata stessa.

- **sunglint:** il *sunglint* avviene quando il satellite osserva la Terra nella direzione nella quale avviene la riflessione della luce solare sulla superficie marina. In presenza di onde il fenomeno risulta particolarmente accentuato in quanto la differente inclinazione delle creste delle onde crea sulle immagini delle aree che sembrano luccicare. Questo effetto varia a seconda della posizione del sensore, della geometria di acquisizione e dell'angolo di azimut e di elevazione del sole.

Inoltre, in caso di immagini con una bassa illuminazione, risulta difficile anche per un occhio umano riconoscere un target rispetto allo sfondo. Tale problematica è ancora oggetto di numerosi studi scientifici.

5.1.3 Rilevazione dell'obiettivo

Dopo aver applicato al meglio le procedure di land-masking e rimozione degli effetti atmosferici, si passa alla fase di applicazione dell'algoritmo di *detection* che rappresenta la parte essenziale dell'intera trattazione. Lo scopo di tale fase è, appunto, quella di identificare con successo i pixel che probabilmente sono rappresentativi di imbarcazioni.

Come è facile intuire, esistono molteplici approcci atti ad identificare ed isolare taluni pixel. Il metodo più comune ed utilizzato si basa sul fatto che le navi appaiono più chiare rispetto agli immediati contorni; in questo caso si usano dei detector di contrasto locale. [3].

L'idea di base, invece, dei cosiddetti metodi *threshold-based* è quella di suddividere l'immagine in parti e di stabilire quali pixel superano o meno la determinata soglia nell'istogramma. Questi algoritmi risultano particolarmente idonei e performanti quando vi è grande contrasto tra target e lo sfondo marino.

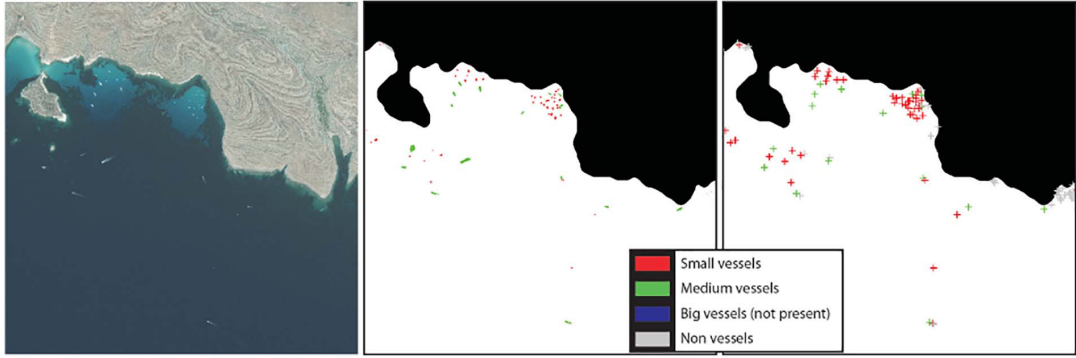


Figura 5.3: Esempio di riconoscimento e classifica di imbarcazione con sensore ottico sulle coste di Lampedusa.

Un'altra metodologia usata è quella basata sull'analisi di **forma e struttura**, ove l'algoritmo predilige le zone dell'immagine nelle quali si riscontrano forme squadrate e spigolose che potrebbero essere assimilabili a delle imbarcazioni.

5.1.4 Il riconoscimento

Lo scopo della fase di riconoscimento è quella di riconoscere quali dei punti identificati come possibili target corrispondano realmente a delle imbarcazioni in mare e di rimuovere, di fatti, i falsi positivi.

Tale fase si attua principalmente basandosi su caratteristiche geometriche (lunghezza, larghezza e area). Ciò che si analizza è spesso il rapporto tra lunghezza e larghezza per verificare se esso è conforme a quello di una imbarcazione adottando un parametro di accettazione coerente.

5.1.5 La classificazione

La fase di classifica si pone come obiettivo quello di classificare tutti gli oggetti identificati quali navi in varie classe in base alle loro caratteristiche. La classificazione può essere diversa a seconda del parametro al quale si è interessati: è possibile, infatti, classificare in base alle pure dimensioni, alla forma e quindi alla natura dell'imbarcazione (militari, non militari, etc..).

E' intuitivo che non è possibile tracciare una chiara linea di demarcazione nella fase di classifica, ma ci si basa su analisi di similarità e si cerca di ricondurre ogni singola nave all'interno di una specifica classe.

Esistono, anche in questo caso, svariati algoritmi di classificazione quali *Bayesian classifier* [4], *random forest* [5], *Fisher classification* [6], *adaptive boosting* [6] e molti altri.

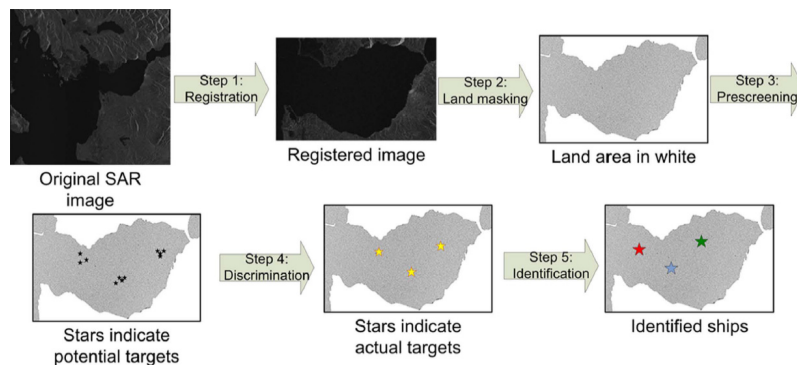


Figura 5.4: Flusso generale del riconoscimento di imbarcazioni con sensore SAR.

5.2 Identificazione del target con sensore SAR

L'utilizzo del sensore SAR per applicazioni di sorveglianza marittima ha il vantaggio, come già detto, di offrire la possibilità di impiego a prescindere delle condizioni atmosferiche in termini di nuvolosità e luce. Tali peculiarità fanno del SAR il mezzo principale per tali applicazioni, anche se negli ultimi anni l'interesse si è spostato anche su altre classi di sensori.

Il SAR risulta particolarmente idoneo alle attività di sorveglianza marittima poichè le navi, come noto, sono costruite con enormi fogli di lamiere di ferro, acciaio, estremamente riflettenti e quindi individuabili tramite immagini radar. In aggiunta, è piuttosto verosimile che le navi in oceano aperto siano grandi e di metallo e, viceversa, quelle lungo i litorali siano più piccole e di differenti materiali per ovvie ragioni.

Il riconoscimento di imbarcazioni tramite immagini radar consiste generalmente nell'applicazione successiva di 5 operazioni, come mostrato in fig. 5.4.

5.2.1 Land-masking

Analogamente a quanto discusso nel capitolo precedente, la fase del *land-masking* è fondamentale al fine di eliminare la maggiore fonte di possibili falsi-positivi. L'approccio generalmente seguito è quello di georeferenziare l'immagine satellitare con le mappe geografiche esistenti. Con questa fusione, si eliminano le zone terrestri, isole e isolotti con un'altissima precisione. Essendo i parametri orbitali del satellite che acquisisce l'immagine affetti da errore, ne consegue che anche la georeferenziazione dell'immagine stessa ha degli errori; questi devono essere corretti prima della fusione con le immagini geografiche.

5.2.2 Pre-processamento

Lo scopo del pre-processamento è di facilitare e migliorare la successiva fase di classifica. Di conseguenza, il tipo di pre-processamento dipende dalla natura delle successive azioni operazioni di *detection*. Ad esempio, nonostante il filtraggio del fenomeno di *speckle* [7] migliori la qualità delle immagini SAR, non si ha garanzia del fatto che esso produrrà come effetto un miglioramento prestazionale degli algoritmi di *detection*. Ciononostante, l'approccio maggiormente utilizzato resta quello del filtraggio, appunto, dello *speckle* in diversi modi.

Anche in questo caso, esistono differenti tipologie di filtri: Frost, Butterworth, Wiener sono solo alcuni esempi. [7]

5.2.3 Pre-screening

Gli algoritmi impiegati per la ricerca dei pixel che potenzialmente possono essere candidati a essere eletti dei target vengono definiti *algoritmi di pre-screening*. GLi studi condotti hanno dimostrato che nessuno di questi, ne tanto meno una combinazione di essi, è in grado di non commettere errori. Per questo, l'elaborazione delle immagini deve proseguire con la fase di discriminazione dei pixel stessi.

Sono due i fattori che confermano il fatto di quanto sia importante la fase di discriminazione. In primo luogo, gli algoritmi di prescreening hanno spesso dei parametri di design che possono essere regolati in modo da ottenere un trade-off quanto più vantaggioso tra falsi positivi e pixel non discriminati. Infine, è necessario che il processamento dei dati sia quanto più *real time* e quindi la velocità computazionale è sempre un parametro da tenere in considerazione nella fase di concepimento dell'algoritmo stesso.

Gli algoritmi di pre-screening, nella maggior parte dei casi, lavorano sulla lucentezza dei pixel, identificando le navi nei pixel che mostrano una chiarezza maggiore rispetto quelli circostanti; lo sfondo viene modellato statisticamente e quindi vengono cercati singoli pixel o gruppi di essi la cui chiarezza è statisticamente molto discorde dal valore di background. E' superfluo sottolineare che, ancora una volta, i fattori da tenere in considerazione sono molti nella fase di design dell'algoritmo: dall'angolo di acquisizione, al tipo di immagine, alla frequenza del radar; sono tutti fattori che influenzano la bontà o meno dell'algoritmo.

Il più semplice metodo di ricerca è quello, ovviamente, di ricercare i pixel aventi una lucentezza superiore a una determinata soglia o threshold: tali algoritmi sono detti appunto di *global threshold*. Dal momento che la *radar cross section* dipende dal materiale con il quale l'onda elettromagnetica interagisce, dall'angolo di osservazione e dalla risoluzione del radar, può succedere che una nave

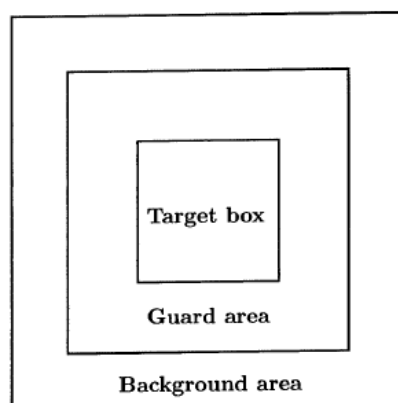


Figura 5.5: Funzionamento degli algoritmi basati su adaptive threshold.

che navighi in direzione perpendicolare a quella di acquisizione venga riconosciuta con maggiore difficoltà rispetto a una che viaggia in direzione parallela. Per questi motivi, la scelta dell'utilizzo di una soglia fissa non viene quasi mai adottata.

Viceversa, si prediligono algoritmi di prescreening nei quali la soglia è di tipo adattiva. Questi, noti con il nome di **CFAR detector (Constant False Alarm Rate)**, identificano pixel che hanno una chiarezza fortemente diversa rispetto alla zona circostante, non limitandosi ad una mera comparazione in termini di valore assoluto.

Analizzando l'immagine pixel per pixel e identificato un pixel con una chiarezza anomale rispetto al precedente, lo candidano a possibile target. Successivamente, l'algoritmo definisce un'area di contorno (ring) e ne analizza le statistiche per ottenere delle conferme o per evitare quindi l'elezione a target di un falso positivo.

5.2.4 Gli algoritmi di riconoscimento

L'obiettivo che si prefigge la fase di riconoscimento è principalmente quello di ridurre i falsi positivi derivanti dalle fasi precedenti. Gli algoritmi in questa fase processano i potenziali pixel target e hanno lo scopo di discriminare, appunto, i veri target dai falsi positivi.

Molti di tali algoritmi includono un sistema per identificazione della scia delle imbarcazioni quale informazione aggiuntiva, anche se in talune circostanze può essere fuorviante poichè imbarcazioni piccole solitamente lasciano scia molto brevi e che si dissolvono istantaneamente. Si deve considerare, però, che l'attendibilità risente di fattori esterni che influenzano l'entità e l'angolazione della scia. Ad ogni modo, l'analisi delle scie può in alcuni casi fornire indicazioni ulteriori riguardanti velocità e direzione di una nave, se correttamente interpretata.

Generalmente, gli algoritmi di discriminazione raggruppano pixel riconosciuti quali imbarca-

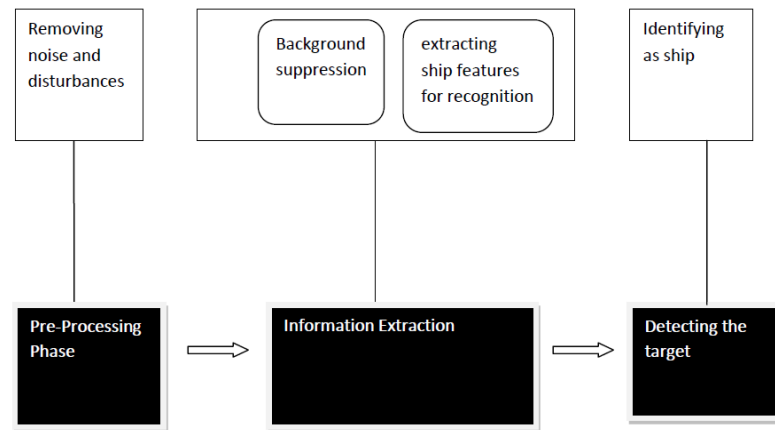


Figura 5.6: Flowchart dell'identificazione di target nelle immagini iperspettrali.

zioni in uno unico e quindi estrapolano informazioni riguardanti forma, lunghezza, larghezza del target. Naturalmente, nel caso di raggruppamenti che danno vita a una forma/dimensioni inverosimili, l'algoritmo scarta tali pixel. Ad esempio, si consideri un'applicazioni nella quale si intende ricercare imbarcazioni intente in attività di pesca illegale. Se, in questo caso, vengono identificati 5 o più pixel target con un sensore avente risoluzione 30m, è evidente che si tratta di un falso positivo. Tale concetto può essere applicato a qualsiasi tipo di applicazione e in linea generale. [8]

Analogamente, navi mercantili sono caratterizzate da un rapporto di lunghezza e larghezza pari a 6/7 e per le navi militari fino a 10.

Sono state proposte, per concludere, tante varianti di algoritmi quali Wackerman [9], Eldhuset [10], Gower [11], che si differenziano per approccio e per il settaggio di alcuni parametri di elaborazione, ma hanno tutti lo scopo di discriminare i pixel target.

5.3 Identificazione del target con sensore iperspettrale

Il processamento di analisi dell'immagini iperspettrali per la sorveglianza marittima e il controllo delle imbarcazioni in mare si articola in tre fasi distinte: prima di tutto, (1) si compie un pre-processamento che ha lo scopo di rimuovere eventuale rumore e disturbi, (2) si passa alla rimozione del background e si estraggono determinate caratteristiche e, per finire, (3) si analizza l'immagine per indetificarne i target.

5.3.1 Il pre-processamento e la rimozione del background

La fase del pre-processamento ha lo scopo, analogamente a quanto accade nel riconoscimento con sensori radar, di rimuovere le fonti di errori, migliorare le immagini servendosi di tecniche quali

binarization, thresholding, resizing e normalization [12]. In aggiunta, è opportuno considerare anche gli effetti relativi all'imprecisione di calibrazione radiometrica del sensore utilizzato.

Inoltre, anche gli effetti sistematici relativi alle condizioni di osservazione della scena influenzano negativamente la qualità dell'immagine. In particolare, si tratta degli effetti relativi all'angolo di elevazione del sole al momento dell'acquisizione e degli effetti dell'atmosfera. Quest'ultima può degradare il segnale in due modi, alterando il valore della radianza e introducendo percorsi di multipath nella propagazione del segnale; questi effetti vanno correttamente valutati e corretti in tale fase. La loro mitigazione è ancora oggetto di numerosi studi scientifici di ricerca.

Vista la grande dimensione delle immagini e della quantità di dati che esse contengono, eliminare correttamente il background dalla scena osservata rende la successiva elaborazione più veloce e performante. Allo stesso modo, i pixel costituiti da coperture nuvolose non apportano informazioni utili e pertanto vanno rimosse. Naturalmente, esistono diversi metodi per separare le due componenti, ognuno con le proprie caratteristiche di velocità e complessità d'esecuzione. Di seguito sono riportati alcuni esempi:

- **Reed-Xiaoli (RX):** è un algoritmo molto efficace nelle immagini iperspettrali per discriminare zone d'interesse dallo sfondo; questo stima i vettori spettrali del presunto sfondo e poi calcola la distanza spettrale dei pixel da quello che ha calcolato come essere lo sfondo. Infine, effettuando una comparazione tra le firme spettrali, si decide che quelli oltre una certa differenza siano pixel candidati ad appartenere a una zona di interesse.
- **Constrained Energy Minimization (CEM):** funziona molto bene nel caso in cui il target ricercato è conosciuto e lo sfondo è sconosciuto; si estraggono quindi i segnali spettrali di interessi e vengono soppressi i meno significativi.
- **Orthogonal Subspace Projection (OSP):** la firma spettrale del target ricercato ricopre il ruolo di firma spettrale desiderata, mentre le altre sono indesiderate. La funzionalità è regolata dalla seguente equazione:

$$x = a\alpha_d + b\alpha_t + n \quad (5.1)$$

ove la **a** rappresenta la firma spettrale corrispondente al target ricercato, α_d è associata alla firma spettrale del target, **b** è l'incognita associata allo sfondo indesiderato, α_t è associato allo sfondo ed **n** rappresenta il rumore. [13].

5.3.2 Rilevazione dell'obiettivo

Il riconoscimento del target è, senza subbio, lo scopo principale dell'applicazione. Quando le proprietà del target desiderato sono uniche o facilmente distinguibili dallo sfondo, l'utilizzo di procedure automatiche diventa conveniente, ma al tempo stesso la completa automatizzazione dell'intera fase non è molto performante. Dal momento che spesso i target ricoprono delle dimensioni inferiori a quelle di un singolo pixel, è opportuno fare delle osservazioni su tecniche chiamate di *subpixel spectral mixture estimation* che consentono di identificare determinate firme spettrali di target, come detto, più piccole del singolo pixel. Esistono, ancora una volta, molti approcci al tema dell'unmixing. Generalmente, vengono utilizzati dei metodi lineari per la loro semplicità matematica.

E' importante sottolineare come tale tecnica permetta di raggiungere delle risoluzioni geometriche ben più elevate rispetto a quella del sensore stesso, aumentando di fatto le capacità di osservazione e di identificazione di target.

L'equazione generale che individua il pixel come una combinazione di un numero i di firme spettrali diverse è:

$$S_i = \sum_k f_k M_{ki} + e_i \quad (5.2)$$

ove S_i rappresenta il segnale osservato nella banda i -esima, M_{ki} è l' i -esimo componente del fattore k , f_k è la frazione del fattore k ed e_i costituisce l'errore residuo per la banda i . In questo modo, la soluzione dell'unmixing diventa il trovare spettri appropriati dei fattori e fare una ricerca inversa per ogni segnale S osservato al fine di determinare la corrispondente frazione f_k che si allinea al meglio ai valori di S , nella matrice data da:

$$F = M^{-1}S + E \quad (5.3)$$

Infine, è doveroso sottolineare che le analisi di unmixing possono essere effettuate analizzando il dominio della radianza, della riflettanza e nel dominio logaritmo della riflettanza. [18]

Capitolo 6

Il co-utilizzo delle informazioni dalle immagini radar, ottiche e iperspettrali nella sorveglianza marittima

6.1 L'uso del sensore radar

Come visto nel capitolo precedente, ogni tipologia di sensore offre delle informazioni differenti e vanta determinate prestazioni facendo riferimento al caso della sorveglianza marittima. Risulta interessante, dunque, indagare sui possibili benefici derivanti dal co-utilizzo di tutte le risorse a disposizione, poichè per natura forniscono informazioni di natura estremamente diversa.

In tale ambito, la presente trattazione si pone quale obiettivo quello di esplorare la consistenza e coerenza e delle informazioni ricavabili dalla stessa scena osservata con sensore radar, ottico e iperspettrale, in particolar modo nel tema del controllo marittimo. Si è deciso di concentrarsi su questa tipologia di sensori per ovvie ragioni: il Ministero della Difesa, in collaborazione con l'Agenzia Spaziale Italiana, dispone ed ha accesso alle immagini satellitari della costellazione COSMO-SkyMed, del satellite spia OPTSAT-3000 e del nuovo satellite a payload iperspettrale Pr.Is.M.A.

Come illustrato al punto 5.2, il radar ad apertura sintetica è stato il sensore maggiormente utilizzato negli anni per tale scopo; questa tipologia di sensore consente di ottenere delle precise

informazioni riguardanti la forma delle navi, specie nel caso di immagini ad alta risoluzione quali quelle di COSMO-SkyMed. Il coefficiente di back-scattering, infatti, delle superfici metalliche risulta molto più alto che dell'acqua e pertanto facilmente identificabile rispetto al background.

Ciononostante, gli studi scientifici e sperimentali dimostrano che in fase di elaborazione si ha un considerevole numero di falsi positivi (circa il 20 %), dovuti al fatto che l'onda elettromagnetica interagisce in modo completamente differente in condizioni di mare piatto o in presenza di onde. Ne consegue che già in un mare non necessariamente molto agitato, ove le onde sono tante ed alte, l'applicazione di determinati algoritmi alle immagini radar risente molto di questo ultimo fattore e ne peggiora drasticamente le prestazioni. Le prestazioni possono essere leggermente migliorate correlando le probabili navi riconosciute in fase di elaborazione con il sistema AIS; spesso, però, lo scopo dell'applicazione presuppone che ci si trovi ad indagare in situazioni presumibilmente illecite e pertanto con imbarcazioni non schedate dal sistema AIS.

6.1.1 Il contributo di PRISMA

Il satellite PRISMA, come spiegato al capitolo 4.1 e di previsto lancio nel mese di marzo 2019, è dotato di un payload iperspettrale e sarà il primo del suo genere in Europa. L'Italia e la Difesa italiana, con la missione PRISMA, acquisirà una capacità spaziale di primo piano nel quadro europeo. Per tali ragioni, è opportuno studiare possibili applicazioni di tipo duale e capire quale possa essere il valore aggiunto dato dalle immagini del satellite ai diversi temi.

E' conveniente soffermarsi e studiare a fondo la questione, poichè le geoinformazioni ricavate potranno anche essere vendute agli stati partner e a chi ne faccia richiesta. Al riguardo, l'Agenzia Spaziale Italiana ha stilato un documento di data policy che illustra le modalità di accesso e di utilizzo delle immagini di PRISMA a vari enti istituzionali, governativi e privati.

Il payload iperspettrale di PRISMA vanta un'altissima risoluzione spettrale e una risoluzione geometrica di 30 metri. Tuttavia, gli studi scientifici degli ultimi anni dimostrano che con opportune tecniche di **sub-pixel detection** la capacità risolutiva può essere considerata attendibile fino a 3 volte quella dichiarata del sensore. Tale valore rende interessante l'applicazione del tema della sorveglianza marittima. Il sensore iperspettrale, infatti, soffre molto meno dei fenomeni di brillantezza delle creste delle onde rispetto al sensore radar SAR. L'iperspettrale, infatti, memorizza la firma spettrale di ogni singolo pixel in centinaia di bande ultra ristrette. Riconoscendo la firma spettrale dei pixel osservata, mostra una spiccata capacità di individuazione della composizione chimica della scena stessa.

Per tali motivi, esso può contribuire in primo luogo all'esclusione di target falsi positivi identifi-



Figura 6.1: Immagine RGB di Sentinel 2 del porto di Rotterdam (29 marzo 2019).

cati dal sensore radar e, allo stesso tempo, dare conferma o meno dei target identificati dal sensore radar.

In aggiunta, il sensore iperspettrale è in grado, come detto, di dare un'idea della composizione chimica del target osservato; ciò può rappresentare un grande valore aggiunto all'immagine radar in quanto può identificare il materiale con il quale è costruita un'imbarcazione, e ciò introduce dei risvolti molto importanti nel campo intelligence. Navi che pescano illegalmente sono fatte di materiali diversi da gommoni che trafficano esseri umani e da navi mercantili, e così via.



Figura 6.2: Zoom su 2 navi diverse con marker.

A supporto delle ipotesi fatte, è stata analizzata un'immagine multispettrale del satellite **Sentinel 2** acquisita il 29 marzo 2019 alle ore 10:51:06 nei pressi del porto di Rotterdam (6.1), il più grande d'Europa. Il satellite dell'ESA dispone di un payload multispettrale a 13 bande in orbita LEO; l'immagine illustrata è stata ricostruita utilizzando la procedura automatica che genera immagini a colori combinando le bande del rosso, verde e blu del software opensource **SNAP** dell'ESA. La 6.2 mostra un dettaglio dell'immagine in cui sono state individuate 2 navi di differenti dimensioni; su di esse sono stati posizionati dei pin così come sul mare aperto.

Successivamente, utilizzando la funzione *spectrum view* del software SNAP, si è generato un grafico raffigurante i valori di riflettanza dei pixel costituenti l'immagine nello spettro elettromagnetico di interesse. Come è possibile evincere dalla 6.3, esistono differenze evidenti tra le curve di riflettanza del mare aperto e quella delle 2 navi. In aggiunta, è possibile apprezzare delle difformità tra le firme spettrali delle 2 navi stesse, significando, ad esempio, che esse sono costituite da diversi materiali o che esse trasportano merci differenti.

In questo modo, avendo a disposizione un database di di firme spettrali conosciute a priori, diventa molto agevole e speditivo riconoscere con discreta precisione la tipologia di navi osservata e/o ipotizzare attività che essa svolge, avvalorando la propria tesi con un confronto diretto con il sistema AIS.

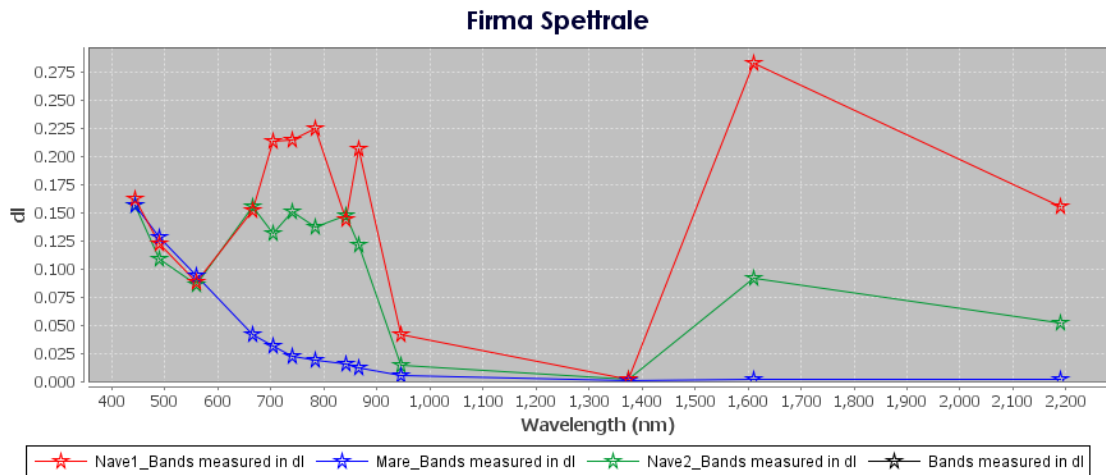


Figura 6.3: Firma spettrale di due navi e mare aperto.

Un ultimo esempio, illustrato in figura 6.4, rappresenta lo zoom su di una nave mercantile che lascia dietro di se una scia ben visibile e duratura. Lo scopo di questo analisi è quello di mostrare che la scia, riconducibile a condizioni di mare agitato, viene correttamente riconosciuta come acqua dal sensore multispettrale. Anche in questo caso, sono stati utilizzati 2 pin (1 sulla nave e 1 sulla sua scia), ed utilizzata la funzione *spectrum view* del software SNAP. La 6.5 mostra le firme spettrali, appunto, dei 2 pin segnati. E' possibile dedurre che le firme spettrali differiscono

notevolmente tra loro e, cosa ancor più interessante, che la firma spettrale del pin posizionato sulla scia della nave può essere ricondotto con buon grado di precisione alla firma spettrale del mare aperto, riducendo drasticamente di fatto il numero di falsi positivi del sensore radar.



Figura 6.4: Zoom su nave mercantile con evidente scia.

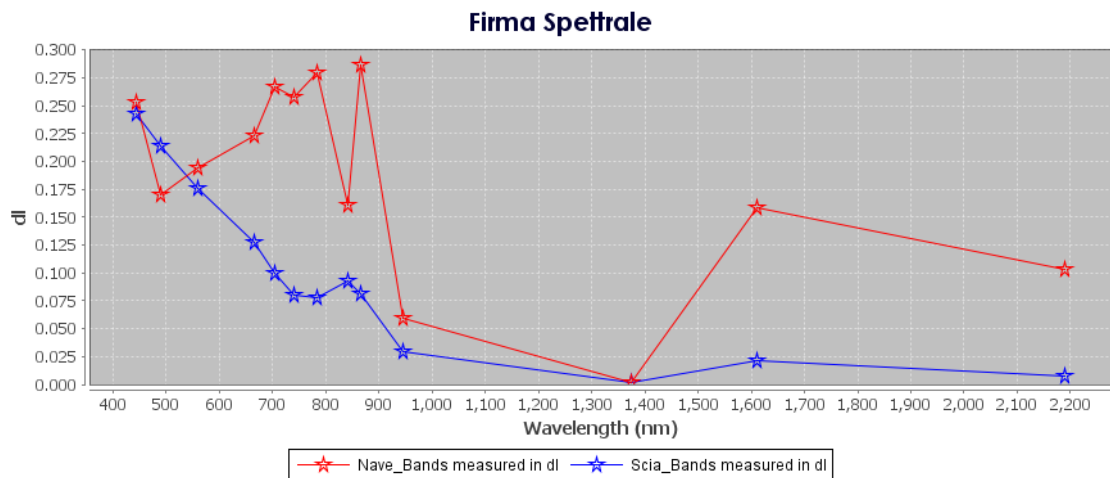


Figura 6.5: Firma spettrale della nave mercantile e della sua scia.

Analogamente, è stata acquisita un'immagine satellitare multispettrale di Sentinel 2 sul porto della città di Hong Kong (12 marzo 2019 alle ore 06:51) ove è visibile il viadotto più lungo del mondo (6.6), inaugurato lo scorso ottobre 2018, che lo collega alla città di Macao. Hong Kong ha un porto che è tra i più attivi del mondo per quantità di merce in transito ed è per questo un punto di grande interesse.

Dell'intera immagine, è stata presa in esame la parte contenente il pezzo sottomarino del



Figura 6.6: Immagine multispettrale del porto di Hong Kong (12/03/2019).

viadotto lungo circa 7km, raffigurato nella 6.7. Successivamente, sono stati posizionati nr. 3 pin in corrispondenza della nave che sta attraversando il viadotto, del mare aperto e del ponte stesso. Ancora una volta, l'analisi dei valori di riflettanza dei 3 pin (6.7) ha evidenziato le notevoli differenze di firme spettrale dei 3 soggetti osservati. Si può apprezzare, in particolare, che i valori di riflettanza del ponte nelle ultime bande assuma dei valori intermedi tra quelli della nave (metallica) e quelli dell'acqua del mare.

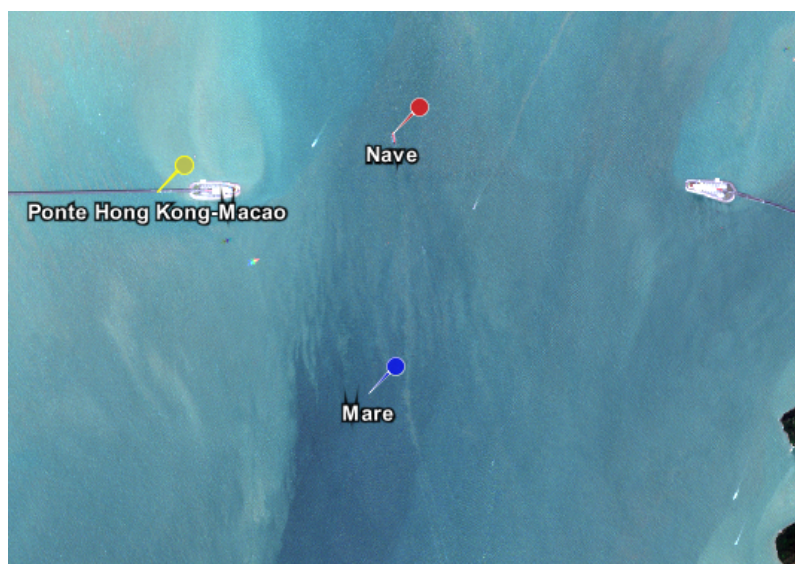


Figura 6.7: Particolare del viadotto sottomarino e posizionamento dei pin.

Così facendo, utilizzando algoritmi di riconoscimento citati ai punti precedenti della trattazione, si è dimostrato che eventuali falsi positivi riconosciuti dal sensore SAR possono essere discriminati

meglio dal sensore iperspettrale che è caratterizzato, in aggiunta, da una risoluzione spettrale ben più elevata di quella del satellite Sentinel 2.

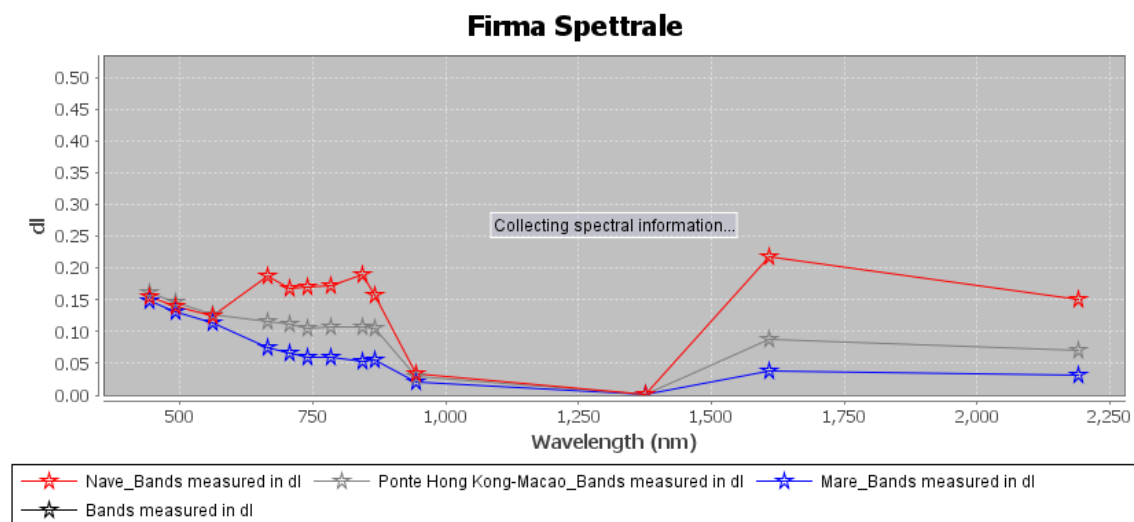


Figura 6.8: Firme spettrali della nave, del ponte Hong Kong-Macao e del mare.

E' opportuno sottolineare, tuttavia, che i concetti sovra esposti sono validi in linea generale, ma in fase di elaborazione la differente tempistica di acquisizione delle immagini dei sensori e quindi la georeferenziazione delle imbarcazioni cambia e va tenuta in considerazione. Ciononostante, le differenze temporali di acquisizione possono essere minimizzate scegliendo opportunamente l'orbita di acquisizione dei vari sistemi. A prescindere da un eventuale confronto diretto delle immagini acquisite, può essere utile anche avere immagini diverse raccolte a istanti diversi per fini strategici o per osservare i movimenti di tali imbarcazioni.

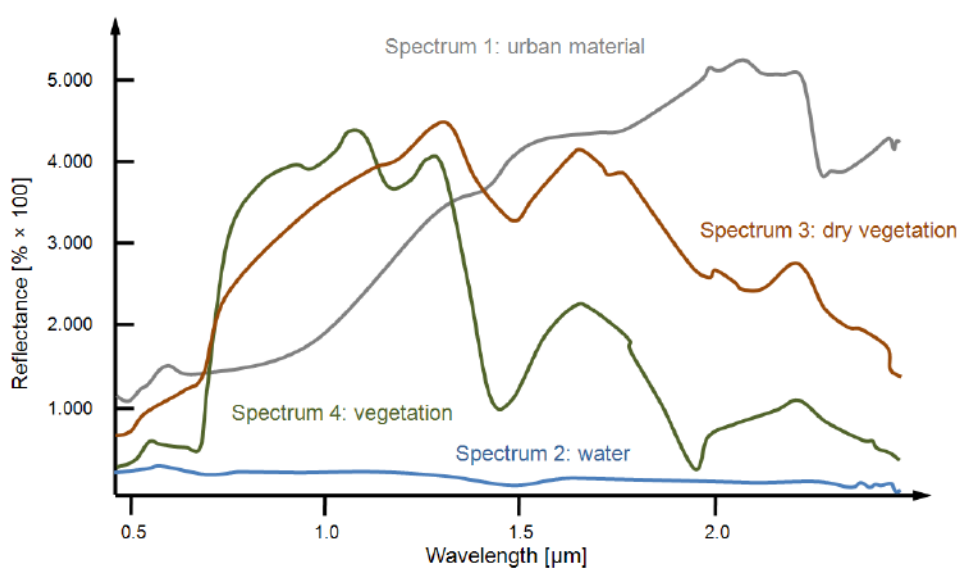


Figura 6.9: Esempio di firme spettrali molto differenti tra loro.

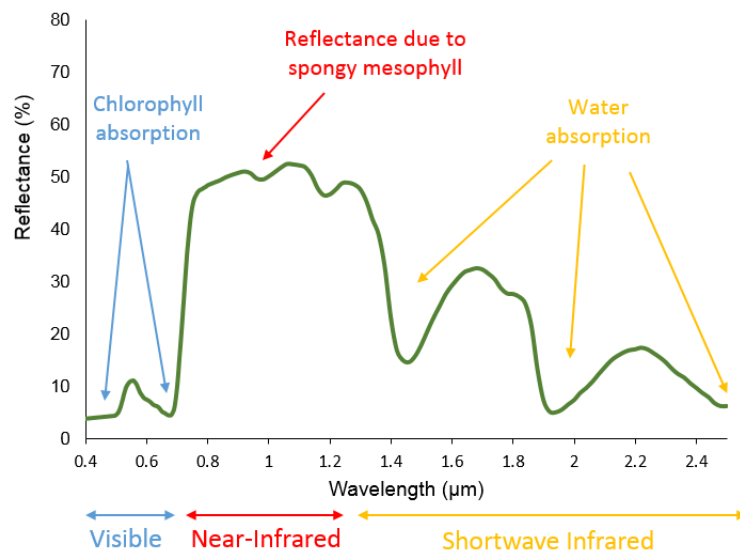


Figura 6.10: Contributi alla formazione della firma spettrale nelle varie bande.

Come è possibile intuire dalla fig. 6.10, la firma spettrale è formata dal contributo di vari fattori nelle varie bande. In particolare, nel caso considerato della firma spettrale di vegetazione classica, si vede come il basso indice di riflettanza nella banda che va dai 0,4-0,7 μm è dovuta all'assorbimento della clorofilla. Analogamente, nel vicino infrarosso il contributo è dato dallo strato interiore delle foglie caratterizzato da un ampio spazio intracellulare. Infine, dai 1,4-2,4 μm è maggiormente visibile il contributo dell'assorbimento dovuto alla componente acqua delle foglie. Per questo, la firma spettrale di vegetazione secca è diversa da quella in vigore, e tale caratteristica può essere sfruttata.

Tale principio di applicabilità è valido per qualsiasi tipo di materiale e, usufruendo di un database di firme spettrali ampio e dettagliato, si può risalire con poco sforzo ad informazioni di grande accuratezza come ad esempio sullo stato di una vegetazione o alla composizione di una lega metallica che costituisce lo scafo di una nave.

Pertanto, è facilmente visibile il fatto che firme spettrali di vegetazione, acqua e materiali ferrosi sono estremamente differenti, e ciò avvalorla la tesi dell'applicabilità dei concetti esposti in precedenza al tema della sorveglianza marittima, sia essa in mare aperto o in prossimità di un litorale o porto.

6.2 Il ruolo dell'intelligenza artificiale

La straordinaria quantità di immagini provenienti da sensori di natura differente, unita alla crescente complessità dei dati da analizzare (si pensi già alle capacità di PRISMA di immagini in più di

200 bande spettrali), rende sempre più conveniente e quasi indispensabile il ricorrere all'intelligenza artificiale al fine di snellire i processi elaborativi e migliorare le prestazioni generali. L'intelligenza artificiale è diventato, negli ultimissimi anni, uno dei temi più discussi anche nel campo spaziale ed è tuttora in fase di studio. Sono stati condotti recentemente numerosi studi [14] [15] [16] sull'applicazione di particolari reti neurali per migliorare e velocizzare la classificazione di immagini iperspettrali; i risultati confermano la bontà dei metodi e la necessità di dover investire molto in questo settore.

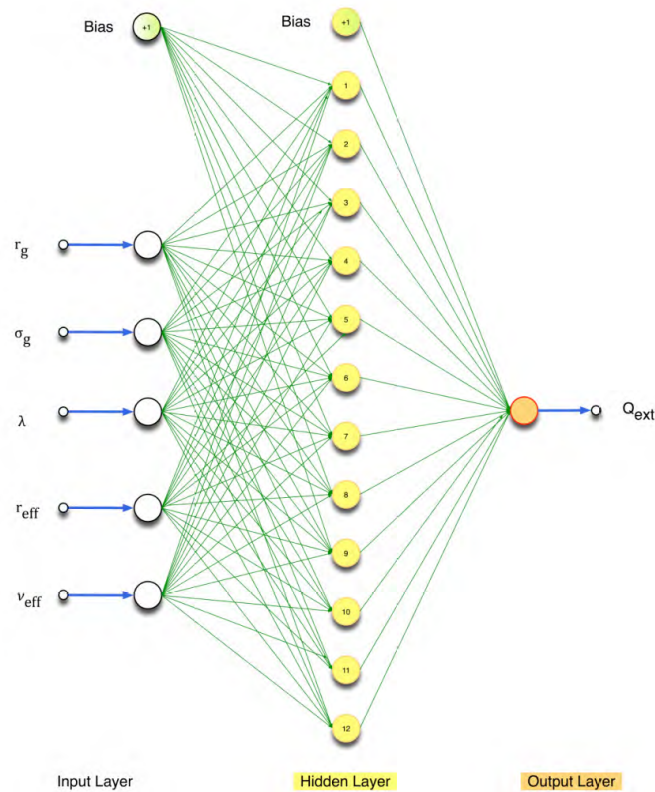


Figura 6.11: Esempio di architettura di una rete neurale con 5 input e 12 nodi nascosti.

6.2.1 Le reti neurali

Le reti neurali possono essere di varia tipologia, generalmente non-parametriche e basate su algoritmi di autoapprendimento e ispirate alle reti neurali del nostro organismo. Le reti neurali computazionali consistono di un gruppo di neuroni artificiali interconnessi che processano parallelamente le informazioni usando un approccio connettivo. Esse sono delle reti non-lineari che possono essere utilizzate per modellare delle relazioni tra input e output; alla loro base vi è il cosiddetto **nodo**, il quale riceve un input da altri nodi o da una fonte esterna alla rete. Ad ogni

input, generalmente, viene associato un peso w , che può essere modificato dinamicamente dalla macchina. Il nodo svolge una determinata funzione f , pesando opportunamente gli ingressi:

$$y_i = f\left(\sum_j w_{ij}y_j\right) \quad (6.1)$$

L'output del nodo può, a sua volta, è l'input di altri nodi. Una rete neurale è formata da numerosi nodi interconnessi tra loro.

6.2.2 Applicazione dell'AI al telerilevamento satellitare

E' possibile distinguere in due gruppi di casi di utilizzo dell'intelligenza artificiale nel telerilevamento da satellite:

- **Applicazioni ad 1 livello:** in cui l'AI viene impiegate direttamente all'immagine;
- **Applicazioni multi livello:** nelle quali le informazioni provenienti da immagini vengono integrate con altre fonti non necessariamente satellitari. Sono molto più complesse delle precedenti e lavorano con strati di pipeline.

Nel primo caso, una classica applicazione può essere quella del riconoscimento di oggetti. Ma il vero aspetto interessante dell'intelligenza artificiale è che può essere utilizzata per il cosiddetto **change detection**, ovvero monitorare i cambiamenti tra due immagini acquisite in momenti successivi per scopi che spaziano dal riconoscimento di oggetti, alla classificazione dell'utilizzo dei suoli, al monitoraggio di iceberg o foreste, al semplice controllo di zone di interesse. Dal momento che immagini successive non possono essere mai identiche in termini di angolo di acquisizione, luminosità dell'immagine, ora e condizioni atmosferiche, l'intelligenza artificiale deve essere in grado, avendo a disposizione tali parametri, di migliorare la confrontabilità delle immagini per permetterne una più precisa elaborazione.

Nel campo iperspettrale, inoltre, l'intelligenza artificiale può aiutare, come mostrato in recenti studi scientifici [17], a selezionare la miglior banda spettrale sulla quale focalizzarsi scartando le altre senza perdere informazioni utili e semplificando enormemente, di conseguenza, la fase di elaborazione e di analisi. Ciò è possibile impiegando delle finissime tecniche di autoapprendimento che migliorano nel tempo.

Nel caso di **Applicazioni multi livello**, come detto, l'intelligenza artificiale si applica a un sistema che ingloba informazioni provenienti da fonti satellitari e non. Si consideri, ad esempio, il voler stimare i proventi un parcheggio in una settimana. Con un discreto numero di immagini satellitari scaglionate nel tempo (il tempo di revisit time di alcune costellazioni di satelliti è di

poche ore) è possibile risalire, tramite l'uso dell' intelligenza artificiale, al numero medio di auto che il parcheggio ha avuto in consegna. Di conseguenza, unendo informazioni che provengono dal mercato, è possibile stimare gli introiti della determinata attività.

Seguendo lo stesso principio, è possibile stimare ad esempio le produzioni di certe colture, come il grano, di una determinata Nazione monitorandone il grado di salute nel tempo tramite le immagini iperspettrali o multi spettrali. Tale informazioni, unita a segnali di geopolitica ed analisi di andamento dei mercati internazionali, è possibile creare un modello che superi le previsioni ufficiali in termini di tempistica e accuratezza dei prezzi.

Infine, una ulteriore applicazione multi livello può essere quella di monitorare l'attività economica di alcune zone di interesse, specialmente alcune difficili da raggiungere quali la Cina o altri paesi emergenti. Monitorando, ad esempio, la presenza di veicoli e il numero, nuove costruzioni, consumo di elettricità con delle riprese notturne e l'attività di import/export contando navi e aerei in partenza e in arrivo, si può giungere a un modello di crescita di quella determinata zona. E' chiaro che l'intelligenza artificiale, in questo caso, svolge un ruolo predominante data la complessità e la straordinaria quantità di dati da analizzare.

La lista delle possibili applicazioni multi-livello è davvero lunga, ma tutte sono accomunate dall'impiego dell'AI con lo scopo di potenziare le capacità di elaborazione ma al tempo stesso riducendone lo sforzo computazionale.

Capitolo 7

Altre applicazioni nel settore difesa, sicurezza ed intelligence

In questo ultimo capitolo, vengono illustrate possibili applicazioni che potrebbero essere sviluppate dallo studio e dall'analisi delle immagini iperspettrali di PRISMA, concentrandosi in particolare modo sui temi di preminente interesse militare nel settore della difesa, della sicurezza e di intelligence.

Come già ampiamente discusso, il satellite PRISMA offrirà delle capacità di osservazione completamente nuove e finora inesplorate. Sono riassunte, di seguito, alcuni particolari impieghi concettualmente altamente validi che necessitano di un approfondito studio nel momento in cui le immagini iperspettrali saranno disponibili.

7.1 Scoperta di oggetti mimetizzati

Il rilevamento di oggetti nascosti o camuffati richiede una misurazione che fornisce un contrasto tra l'oggetto e i materiali di sfondo. Le immagini iperspettrali sono adatte a questa applicazione poiché lo spettro raccolto contiene informazioni relative alla composizione chimica dei materiali. Inoltre, è spesso possibile rilevare la presenza di una firma spettrale di destinazione in quantità sub-pixel quando c'è un sufficiente contrasto spettrale con i materiali di fondo.

Come nell'esempio precedente, la raccolta sul campo delle firme spettrali di entrambi i materiali target e di sfondo è fondamentale per il successo. Bubner et al. (2001) hanno rilevato discrepanze significative tra le firme misurate in laboratorio e in campo. Queste differenze tendono ad essere più evidenti per materiali come i terreni e la vegetazione le cui firme spettrali sono fortemente di-

pendenti dalla struttura della superficie e dove la raccolta del materiale altera in modo significativo quella struttura.

Uno degli usi più diffusi del camuffamento è quello di imitare la firma spettrale della vegetazione. Sebbene il design di tale camuffamento sia relativamente facile quando si analizza l'immagine ad occhio nudo, diventa progressivamente più difficile con l'aumentare della risoluzione spettrale e della gamma di lunghezze d'onda del sensore di imaging. Per il caso iperspettrale, è spesso possibile rilevare oggetti camuffati che rappresentano un minimo del 20% di un pixel. Ciò non è sorprendente dato che la composizione chimica dominante (pigmenti, acqua, cellulosa, lignina) e la complessa struttura tridimensionale della vegetazione sono quasi impossibili da duplicare in un materiale mimetico.

7.2 Individuazione di mine e dispositivi IED

La capacità di individuazione dei cambiamenti nella firma spettrale della scena osservata con acquisizione di immagini successive nel tempo può fornire un significativo aiuto per lo scovamento di mine interrate e/o dispositivi IED. Oltre a rilevare semplicemente incongruenze della natura del terreno tra immagini acquisite nel tempo, l'analisi iperspettrale può anche fornire informazioni sulla tipologia di fonte del disturbo; questo consentirebbe la distinzione dei disturbi del suolo derivanti da attività di sepoltura di mine o IED da altre fonti di disturbo quali il semplice passaggio di veicoli.

La composizione mineralogica dei terreni in superficie varia profondamente da quella di uno strato più profondo, quindi qualsiasi disturbo superficiale è rilevabile come differenza nella mineralogia superficiale in contrasto con le aree circostanti. Avendo la conoscenza del profilo spettrale mineralogico del suolo in funzione della profondità, si può quindi dedurre la profondità del disturbo. Le misurazioni spettrali sul campo sono il mezzo ideale per caratterizzare la mineralogia nei profili del terreno al fine di raccogliere un database di firme spettrali del profilo del suolo; tale strumento rappresenta la chiave per interpretare le immagini di superficie in termini di occorrenza di disturbi del suolo e stabilire la profondità del disturbo [19].

7.3 Rivelazione di target noti

Qualora si vuole condurre un'azione di ricerca di un target conosciuto a priori, è possibile utilizzare efficacemente il sensore iperspettrale a tale scopo. In linea generale esiste, infatti, un'ampia diversità tra le caratteristiche di riflettanza spettrale di un determinato obiettivo noto e del background

della scena nelle regioni infrarosse. La ricerca di una specifica firma spettrale può essere condotta abbastanza facilmente e permette un facile riconoscimento di un determinato target nell'immagine iperspettrale. Una comune applicazione di tipo militare può essere quella di ricerca di veicoli militari in territorio ostile, essendo essi caratterizzati da una firma spettrale notevolmente diversa dalla vegetazione e/o dalla scena che li circonda. Lo stesso principio può essere utilizzato in moltissimi altri casi in cui l'obiettivo è quello di identificare un target noto.

E' doveroso sottolineare che questi elencati sono pochi semplici casi di applicazioni che utilizzano l'analisi iperspettrale, ma le possibilità applicative sono moltissime altre, alcune ancora inesplorate a causa della non disponibilità di immagini iperspettrale, e si avrà la necessità di ulteriori studi che ne confermino la validità.

Capitolo 8

Conclusioni

L'Agenzia Spaziale Italiana e il Ministero della Difesa, con l'avvio della missione PRISMA, la prima del suo genere in Europa, saranno dotati di un nuovo strumento per il telerilevamento che andrà ad aggiungersi alle capacità dei sensori ottici e radar esistenti, consentendo all'Italia di avere un ruolo di primo piano nello scenario internazionale. In questa prospettiva, questo studio mira ad esplorare le opportunità offerte dall'acquisizione di immagini iper-spetttrali, attraverso l'analisi dei benefici connessi alla sinergia di utilizzo con le immagini ottiche e radar.

In particolare lo studio ha preso in esame il settore della sorveglianza marittima, ancorché i concetti esposti siano validi per numerosi altri settori applicativi. In tal senso è stata posta particolare attenzione al ruolo che potrà svolgere l'intelligenza artificiale, come strumento sempre più imprescindibile per poter gestire in maniera efficace e conveniente l'enorme quantità di dati satellitari che si renderanno disponibili. In alcuni settori, infatti, sfruttando le capacità dell'intelligenza artificiale, si potranno avere importanti ricadute economiche e di utilizzo strategico.

In conclusione, per quanto emerge dallo studio, vi è una ragionevole confidenza che il co-utilizzo dalle tre classi di sensori che l'ASI e la Difesa annovereranno tra i propri assetti potrà determinare lo sviluppo di ulteriori applicazioni, ad oggi non ancora esaminate.

Infine, considerato che lo studio ha avuto carattere previsionale e anticipatorio, è auspicabile che, nel momento in cui saranno disponibili le immagini iper-spetttrali del sistema PRISMA, si avrà modo, in via sperimentale, di accertare la reale consistenza delle ipotesi sottese dallo studio volte allo sviluppo di nuove applicazioni nel settore del telerilevamento da satellite, anche in funzione di ausilio al telerilevamento da aereo.

Bibliografia

- [1] Beril Besbinar, A. Aydin Alatan (2014), *Sea detection on high-resolution panchromatic satellite images using texture and intensity*;
- [2] Yang, G., Li, B., Ji, S., Gao, F., Xu, Q., 2014. (2014) *Ship detection from optical satellite images based on sea surface analysis*. IEEE Geosci;
- [3] Harvey, N.R., Porter, R., Theiler, J., (2010) *Ship detection in satellite imagery using rankorder grayscale hit-or-miss transforms*;
- [4] Antelo, J., Ambrosio, G., Gonzalez, J., Galindo, C., (2009) *Ship detection and recognition in high-resolution satellite images*;
- [5] Johansson, P., 2011. *Small vessel detection in high quality optical satellite imagery*. In: Tech. Report Chalmers University of Technology Sweden. JRC, 2008. Integrated Maritime Policy for the EU, Working Document;
- [6] Zhang, W., Bian, C., Zhao, X., Hou, Q., 2012. *Ship target segmentation and detection in complex optical remote sensing image based on component tree characteristics discrimination*;
- [7] Australian Government - Department of Defense. (2004) *The State-of-Art in ship detection using Synthetic Aperture Radar imagery*;
- [8] Gloaguen Pierre, Mahevas Stephanie, Rivot Etienne, Woillez Mathieu, Guitton Jerome, Vermard Youen, Etienne Marie-Pierre *An autoregressive model to describe fishing vessel movement and activity*;
- [9] C.C. Wackerman, K.S. Friedman, W.G. Pichel P. Clemente-Colon and X. Li. (2001) *Automatic detection of ships in RADARSAT-1 SAR imagery*;
- [10] K. Eldhuset (1996) *An automatic ship and ship wake detection system for spaceborne SAR images in coastal regions*;

- [11] J. Gower, S. Skey (2014) *Evaluation of RADARSAT ScanSAR for Observing Wind, Slicks and Fish-Boats*;
- [12] Dr. Vijayalakshmi M.N. (2015) *A review of hypesrspectral remote sensing for object identification*;
- [13] Manoj K. Arora, Shweta Bansal, Sangeeta Khare (2013) *Comparative Assessment of Some Target Detection Algorithms for Hyperspectral Images*
- [14] Juan Mario Haut, Javier Plaza (2018) *Learning With Convolutional Neural Networks for Hyperspectral Image Classification Using a New Bayesian Approach*
- [15] M.E. Paoletti, J.M. Haut, J. Plaza, A. Plaza (2018) *A new deep convolutional neural network for fast hyperspectral image classification*
- [16] Juan Mario Haut, Mercedes Eugenia Paoletti, Javier Plaza, Antonio Plaza (2018) *Fast dimensionality reduction and classification of hyperspectral images with extreme learning machines*
- [17] Elissa Gilbert (2019, January 30th) *Help of artificial intelligence to find hidden lunar resources in moon's craters*
- [18] Alan R.Gillespie, *Spectral mixture analysis of multispectral thermal infrared images*
- [19] J. Michael Cathcart (2008), *Adaptive spatial sampling schemes for the detection of minefields in hyperspectral imagery*