

Telerilevamento (Remote Sensing) per mezzo dei satelliti¹⁾

30.1 - Introduzione

Remote sensing é una scienza multidisciplinare che si occupa del monitoraggio, della identificazione e della valutazione delle risorse naturali, effettuando l'analisi dei dati ottenuti attraverso le osservazioni da una piattaforma remota. Questa tecnologia, in fase di sviluppo sin dai primi anni '60, ha mostrato grandi promesse nel migliorare la raccolta di informazioni riguardanti il clima, l'ambiente e le risorse naturali del mondo. L'uso dei satelliti come piattaforme per il Telerilevamento ha aggiunto un'altra dimensione al remote sensing. I satelliti consentono la copertura di ampie aree ad ogni istante e la copertura ripetitiva a intervalli prestabiliti di tempo in condizioni simili all'illuminazione solare utilizzando orbite sincrone con il Sole. Cerchiamo di descrivere l'intero processo del Telerilevamento, dei satelliti utilizzati per tale scopo, dei sensori e dei vari elementi coinvolti nello spazio e nei segmenti terrestri. Speciale attenzione viene data alla configurazione dei satelliti per il telerilevamento e per le stazioni di Terra, e dovunque applicabile, viene fatto un paragone con i sistemi satellitari per le comunicazioni.

30.2 - Panoramica storica²⁾

Nel 1859 Gaspard Tournachon,³⁾ fotografo e pioniere del volo aerostatico francese, scattò una fotografia obliqua di un piccolo villaggio vicino a Parigi da un pallone. Con questa immagine l'era dell'osservazione della Terra e il telerilevamento era iniziato. Il suo esempio fu presto seguito da altre persone in tutto il mondo. Durante la guerra civile negli Stati Uniti la fotografia aerea dai palloni svolse un ruolo importante per rivelare le posizioni di difesa in Virginia. Allo stesso modo altri scienziati e tecnici, in questo periodo di guerra civile negli Stati Uniti, hanno accelerato lo sviluppo della fotografia, obiettivi e uso aereo applicato a questa tecnologia. La tabella 1 mostra alcune date importanti nello sviluppo del telerilevamento.

Il successivo periodo di rapido sviluppo ebbe luogo in Europa e non negli Stati Uniti. Fu durante la prima guerra mondiale che gli aeroplani furono usati a larga scala per la fotoricognizione. Gli aerei si sono dimostrati più affidabili e piattaforme più stabili per l'osservazione della Terra rispetto ai palloni. Nel periodo tra la prima e la seconda guerra mondiale si iniziò con l'uso civile di foto aeree. Campi di applicazione delle foto aeree inclusero, in quel tempo, geologia, selvicoltura, agricoltura e cartografia. Questi sviluppi portarono a macchine fotografiche, pellicole e apparecchiature per l'interpretazione molto migliorate. I più importanti sviluppi della fotografia aerea e dell'interpretazione fotografica

¹⁾ Jain P. K.: Remote Sensing Through Satellites: A Tutorial Review - Microwave Journal, December 2004, Vol. 47, N. 12, pag.22

²⁾ M.V.K. Sivakumar, P.S. Roy, K. Harmsen, S.K. Saha (Editors): Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology: Shefali Aggarwal: Principles of Remote Sensing, pp. 23-38 - World Meteorological Organisation, 2004.

³⁾ Gaspard Felix Tournachon (detto Nadar): Parigi, 6 aprile 1820 - Parigi, 20 marzo 1910.

hanno avuto luogo durante la seconda guerra mondiale. Durante questo periodo si estese lo sviluppo di altri sistemi di imaging come la fotografia nel vicino infrarosso; il rilevamento termico e il radar hanno avuto luogo. La fotografia nel vicino infrarosso e l'infrarosso termico si sono rivelate molto preziose per separare la vera vegetazione dal camuffamento. Il primo successo del radar aereo non è stato utilizzato per scopi civili ma si è rivelato prezioso per i bombardamenti notturni. Come tale il sistema è stato chiamato dai militari "piano indicatore di posizione" ed è stato sviluppato in Gran Bretagna nel 1941.

Tabella 1: Pietre miliari nella Storia del Remote sensing

- 1800 - Scoperta della radiazione infrarossa da parte di Sir W. Herschel
- 1839 - Inizio della pratica della fotografia
- 1847 - Spettro infrarosso mostrato da Jean Bernard Léon Foucault
- 1859 - Fotografia dai palloni
- 1873 - Teoria dello spettro elettromagnetico di J. C. Maxwell
- 1909 - Fotografia dagli aeroplani
- 1916 - Prima guerra mondiale: Ricognizione aerea
- 1935 - Sviluppo del Radar
- 1940 - Seconda guerra mondiale: Applicazioni della parte non visibile dello spettro elettromagnetico
- 1950 - Ricerca e sviluppo militare
- 1959 - Prima fotografia della Terra dallo spazio (Explorer-6)
- 1960 - Lancio del primo satellite meteorologico TIROS (**T**ele**V**ision **I**n**f**ra**R**ed **O**bservation **S**atellite)
- 1970 - Skylab (Prima stazione spaziale USA): Osservazioni telerilevate dallo spazio
- 1972 - Lancio Landsat-1 (chiamato anche ERTS-1) - Primo satellite del programma Landsat USA: Sensore MSS (Membrane-type Surface Stress)
- 1972 - Rapidi progressi nell'elaborazione digitale delle immagini
- 1982 - Lancio di Landsat -4 : Nuova generazione di sensori Landsat: TM (Sensori digitali per il rilevamento di temperatura all'interno di silos o capannoni)
- 1986 - Satellite commerciale francese per l'osservazione della Terra SPOT (**S**atellite **P**our l'**O**bservation de la **T**erre)
- 1986 - Sviluppo di sensori iperspettrali (consentono di analizzare le proprietà del suolo e degli oggetti presenti su di esso attraverso l'analisi della radiazione solare riflessa in regioni dello spettro elettromagnetico invisibili all'occhio umano)
- 1990 - Sviluppo di sistemi spaziali ad alta risoluzione - Primi sviluppi commerciali del telerilevamento
- 1999 - Lancio di EOS (**E**arth **O**bserving **S**ystem): È un programma della NASA per l'osservazione della Terra dallo spazio, comprendente una serie di satelliti artificiali e di strumenti scientifici posti in orbita attorno al pianeta
- 1999 - Lancio di IKONOS, con un sistema di sensori ad altissima risoluzione spaziale

Dopo le guerre degli anni '50 i sistemi di telerilevamento continuarono ad evolversi dai sistemi sviluppati per lo sforzo bellico. La fotografia all'infrarosso a colori (CIR) si è rivelata di grande utilità per le scienze vegetali. Nel 1956 Colwell ha condotto esperimenti sull'uso del CIR per la classificazione e il riconoscimento dei tipi di vegetazione e l'individuazione di vegetazione malata e danneggiata o stressata. Fu anche negli anni '50 che i progressi significativi nella tecnologia radar sono stati raggiunti.

30.3 - Il Processo del Telerilevamento

Il telerilevamento o remote Sensing è la tecnica di dedurre le informazioni su un oggetto, area o fenomeno attraverso l'analisi dei dati acquisiti da un dispositivo sensore che non è in contatto fisico con il bersaglio rilevato. Questa definizione è limitata alle misurazioni effettuate in diverse regioni spettrali delle interazioni tra i bersagli e radiazioni elettromagnetiche (EM) (come luce, calore e onde radio).

Una proprietà fondamentale di un'onda elettromagnetica è, come sappiamo, che la sua velocità e lunghezza d'onda variano quando essa si propaga attraverso mezzi di diversa densità (indice di rifrazione). La sua interazione con la materia può, quindi, cambiare la proprietà dell'onda incidente, cioè l'intensità, la direzione, la lunghezza d'onda, la polarizzazione e la fase. La scienza del remote sensing registra queste variazioni e le usa per interpretare le caratteristiche della materia. Il processo completo del telerilevamento può essere spiegato dalle seguenti sequenze di fasi: 1) una sorgente di energia elettromagnetica (sole/auto emissione), 2) trasmissione dell'energia dalla sorgente alla superficie della Terra, in cui subisce anche assorbimento e dispersione durante il passaggio attraverso l'atmosfera, 3) interazione di radiazione elettromagnetica con la superficie terrestre (riflessione, scattering, assorbimento e riemissione), 4) trasmissione dell'energia riflessa, scatterata, emessa dagli oggetti o caratteristiche della superficie terrestre ai sensori remoti montati a bordo (con le appropriate modifiche dovute agli effetti atmosferici), 5) uscita dati del sensore in forma di segnale elettrico digitale, 6) modulazione e trasmissione dei dati (ora chiamati dati utili via satellite) alla Terra, 7) acquisizione dei dati attraverso una stazione terrestre con inseguimento dell'antenna ricevente, 8) demodulazione dei dati e archiviazione o registrazione in differenti mezzi quali registratori digitali, hard disks, registratori a cassette digitali, ecc., 9) generazione di prodotti mediante elaborazione dei dati a diversi livelli di accuratezza con varie correzioni e 10) interpretazione dei dati e la loro presentazione in forma utile quali floppies, maps, cartucce, dischi, ecc.

30.4 - Fisica del Telerilevamento

L'informazione da un oggetto al sensore si propaga per mezzo di onde elettromagnetiche attraverso l'atmosfera alla velocità della luce, direttamente attraverso il libero spazio così come indirettamente dovute alla riflessione, allo scattering e alla reirradiazione. L'interazione delle onde elettromagnetiche con le superfici naturali e l'atmosfera è fortemente dipendente dalla frequenza delle onde. Il telerilevamento tramite satelliti comporta la decomposizione dell'atmosfera dall'intera colonna atmosferica. Così, le caratteristiche dell'atmosfera sensibilmente determinano l'uso effettivo dello spettro elettromagnetico per remote sensing. Sebbene lo spettro elettromagnetico è infinitamente largo e abbraccia l'intera regione estesa dalle onde radio di lunghezze d'onda più lunghe a quella corrispon-

dente a lunghezze d'onda più corte e ai raggi gamma, molte di tali regioni non possono essere usate per il Telerilevamento a causa di certe limitazioni pratiche. I raggi X e la maggior parte della radiazione ultravioletta sono rese inutilizzabili dalla attenuazione atmosferica (completo assorbimento da parte dello strato di ozono nell'atmosfera superiore), mentre a più basse frequenze, la ionosfera riflette la radiazione totalmente. Quindi, le regioni spettrali (chiamate anche finestre atmosferiche) in cui l'atmosfera è trasparente o presenta un piccolo assorbimento possono essere usate per il remote sensing. Tali finestre sono:

- 1) nella regione dell'ultravioletto: per lunghezze d'onda λ da $0.3\mu\text{m}$ a $0.4\mu\text{m}$.
- 2) nella regione del visibile: per lunghezze d'onda λ da $0.4\mu\text{m}$ a $0.75\mu\text{m}$.
- 3) nella regione del vicino infrarosso: per lunghezze d'onda λ da $0.77\mu\text{m}$ a $1.34\mu\text{m}$.
- 4) nella regione del medio infrarosso: per lunghezze d'onda λ da $1.55\mu\text{m}$ a $2.44\mu\text{m}$.
- 5) nella regione dell'infrarosso termico: per lunghezze d'onda λ da $3.5\mu\text{m}$ a $5\mu\text{m}$, da $8\mu\text{m}$ a $12.5\mu\text{m}$, da $17\mu\text{m}$ a $22\mu\text{m}$.
- 6) nella regione delle microonde: per lunghezze d'onda λ da 2mm a 1000mm.

Il rimanente delle bande spettrali non utilizzabili (oltre a quelle già menzionate che presentano basse attenuazioni) presentano grande attenuazione (assorbimento) dovuta alla presenza del vapore acqueo (H_2O), ossigeno (O_2), ozono (O_3), diossido di Carbonio (CO_2) e aerosol nell'atmosfera. La figura (30.4-1)¹⁾ illustra lo spettro generalizzato di assorbimento dell'atmosfera terrestre nella regione delle microonde.

Molti materiali rispondono in modi distinti (hanno differenti caratteristiche di riflessione spettrali) quando illuminate dalle differenti regioni dello spettro elettromagnetico. Inoltre, all'interno di qualsiasi regione limitata dello spettro, un particolare materiale esibisce un diagramma di radiazione spettrale diagnostico, che è generalmente diverso da quello di un altro materiale. Pertanto, ogni singola sostanza o classe di sostanze correlate ha le sue specifiche caratteristiche spettrali (capacità di rispondere a un'onda EM) o curve di risposta spettrale. Ogni classe di sostanze mostra qualche caratteristica dominante o grafico da cui membri di quella classe possono essere identificate. Per esempio, la vegetazione può riflettere soltanto dal 10 al 15% nella porzione verde dello spettro e da 40 al 60% nel vicino infrarosso. Similmente, l'acqua ed il suolo hanno differenti caratteristiche di riflessione. Tuttavia, le caratteristiche di riflessione spettrali sotto certe condizioni possono essere le stesse per taluni oggetti (acqua e terreno nero bagnato per esempio). In tali casi la separazione degli oggetti basata su una singola banda o lunghezza d'onda sarebbe difficile. Sotto queste condizioni, un'altra porzione dello spettro elettromagnetico che fornisce una distinta separazione è utilizzata. Questo approccio al telerilevamento è chiamato studio in modalità multispettrale degli oggetti e comporta o misure delle segnature spettrali su una o più regioni dello spettro o campionamento delle intensità di radiazione come valori singoli integrati attraverso intervalli specifici o bande di lunghezza d'onda. Il Multi Spectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM) e Linear Imaging Self Scanning Sensor (LISS) sono alcuni esempi dei sensori usati nei satelliti per rivelare la radianza della superficie

¹⁾ Ulaby Fawwaz T., Moore Richard K., Fung Adrian K.: Microwave Remote Sensing Active and Passive, Vol. I, Fundamentals and Radiometry - Artech House, 1981, pag.20.

terrestre in distinte larghezze di banda spettrali.

Trasmissione di microonde attraverso l'atmosfera terrestre lungo la direzione verticale in condizione di cielo chiaro

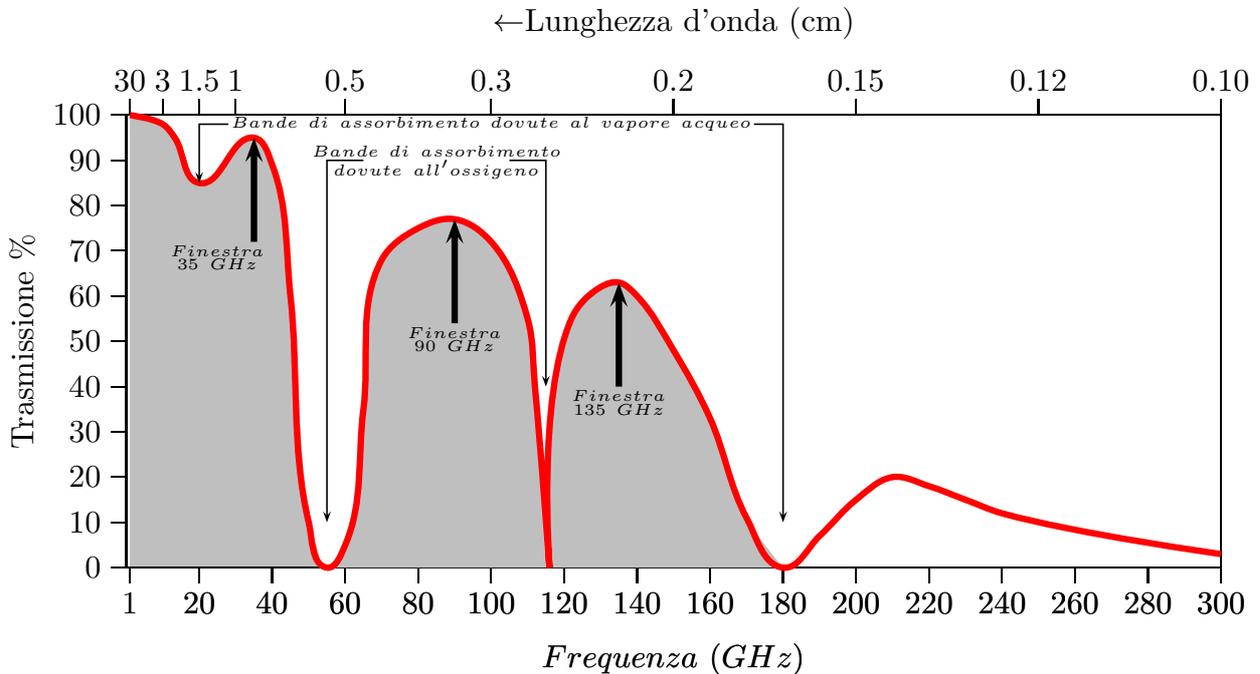


fig.30.4-1

30.5 - Sensori per il Remote Sensing

I sensori per il Remote Sensing possono essere raggruppati in due grandi categorie: **sensori passivi** e **sensori attivi**. I sensori che rivelano radiazione naturale o emessa o riflessa dalla superficie terrestre (vedi figura 30.6-2), sono chiamati **sensori passivi**. Così in un sistema di rilevamento passivo, non vi è controllo sulla sorgente di radiazione elettromagnetica. Esempi di sensori passivi sono macchine fotografiche, scanners multispettrali, ecc. I sensori che hanno la loro sorgente per illuminare gli oggetti sono chiamati **sensori attivi**. Esempi di sensori attivi sono i **Radar ad Apertura Sintetica** e **Radar aerei**. I sensori attivi operano nella regione delle microonde dello spettro elettromagnetico e non necessitano dell'illuminazione del Sole. Essi hanno la capacità di avere buone prestazioni nel remote sensing anche in presenza di nuvole o ogni altra ostruzione, e quindi, sono utilizzati per ottenere informazioni in una regione peninsulare, costiera e valli.

30.6 - Satelliti per Remote Sensing

Il Remote Sensing delle risorse della Terra possono essere fatte utilizzando o aerei o piattaforme spaziali. Aerei commercialmente disponibili sono usati per fare fotografie. Poichè l'altezza degli aeromobili può essere modificata per scelta, le immagini in scala diversa (da 1 ÷ 5000 a 1 ÷ 25000) possono essere adattate per applicazioni specifiche. Vi è anche flessibilità per cambiare il sistema di rilevamento per differenti requisiti. Tuttavia, oltre ad essere costosi, l'ampiezza dell'andana (superficie sulla terra, superficie sulla quale

può essere effettuata una misura indipendente dal sensore, ovvero la distanza coperta attraverso la pista) offerta dal telerilevamento dell'aeromobile è anche meno dovuta alla più bassa altitudine degli aerei. Inoltre, l'aereo non ha accessibilità alle difficoltà del terreno e non può volare in cattive condizioni atmosferiche. Le piattaforme spaziali che usano satelliti per il telerilevamento sono quindi molto utilizzati per osservare la Terra.

I satelliti per Remote sensing sono caratterizzati di trovarsi in orbita quasi polare, circolare, bassa sincrona con il sole (figura 30.6-1), a differenza dei satelliti di comunicazione, che sono collocati in orbita terrestre equatoriale, ellittica e geosincrona a circa 36000 km di altitudine. Lo scopo di porre i satelliti in orbita polare è di prendere vantaggio della rotazione della Terra attorno al suo asse, per portare nuovi segmenti (o settori) della Terra sotto la vista del satellite a condizione che il periodo dell'orbita satellitare sia piccolo rispetto al periodo di rotazione della terra (24 ore). Quindi, la copertura globale ripetitiva è possibile quando i satelliti per remote sensing sono poste in orbita polare sincrone con il sole ad altitudine da 700 a 1000 km (che in effetti determina il periodo orbitale del satellite) con un periodo orbitale di approssimativamente da 100 a 120 minuti. Un'orbita sincrona con il Sole significa che il piano dell'orbita mantiene una orientazione fissa rispetto al Sole. Il piano dell'orbita ruota dello stesso tasso del tasso medio della terra intorno al sole (che è $0^{\circ}.9856/\text{giorno}$). Così, il satellite passa su una particolare latitudine approssimativamente allo stesso tempo locale. Quindi, l'immagine di ogni dato punto sul globo è sempre acquisito approssimativamente allo stesso tempo locale solare del giorno. Questo è vantaggioso dal punto di vista del remote sensing, in quanto garantisce che l'angolo di elevazione del sole sia all'incirca uguale su ogni passaggio del satellite. Come regola generale, un tempo di attraversamento dell'equatore locale delle 10.30 del mattino emerge come statisticamente il migliore dal punto di vista di ottenere una copertura con nubi e foschia minime. Un satellite di telerilevamento, quindi, consente lo studio delle risorse naturali nelle varie stagioni nelle stesse condizioni di illuminazione. Il satellite ritorna alla sua orbita originale dopo ogni intervallo di tempo prefissato (il ciclo ripetitivo satellitare IBS-IC è di 24 giorni con un periodo orbitale di 101 minuti), consentendo così la raccolta ripetuta di dati nello stesso piano alla stessa ora locale.

Satellite in orbita polare

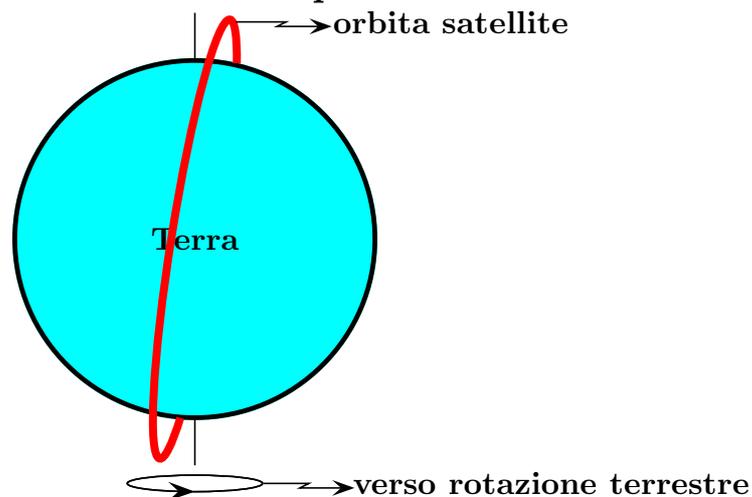


fig.30.6-1

Riflessione della radiazione solare¹⁾

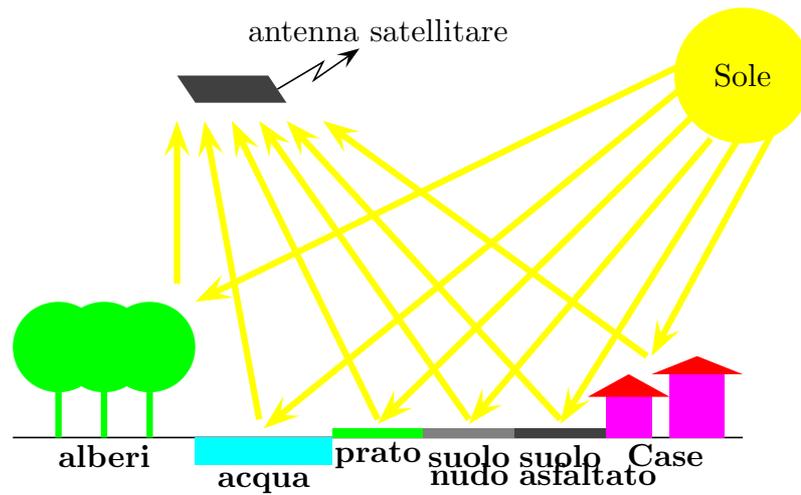


fig.30.6-2

Diversi tipi di superficie come lacqua, il terreno spoglio o la vegetazione riflettono la radiazione in maniera differente. La radiazione riflessa in funzione della lunghezza d'onda viene chiamata **firma spettrale della superficie** (vedi figura 30.6.3).

¹⁾ vedi Riferimento ²⁾ del §30.2, pag.25.

Firme spettrali (Riflettività) di superfici naturali¹⁾

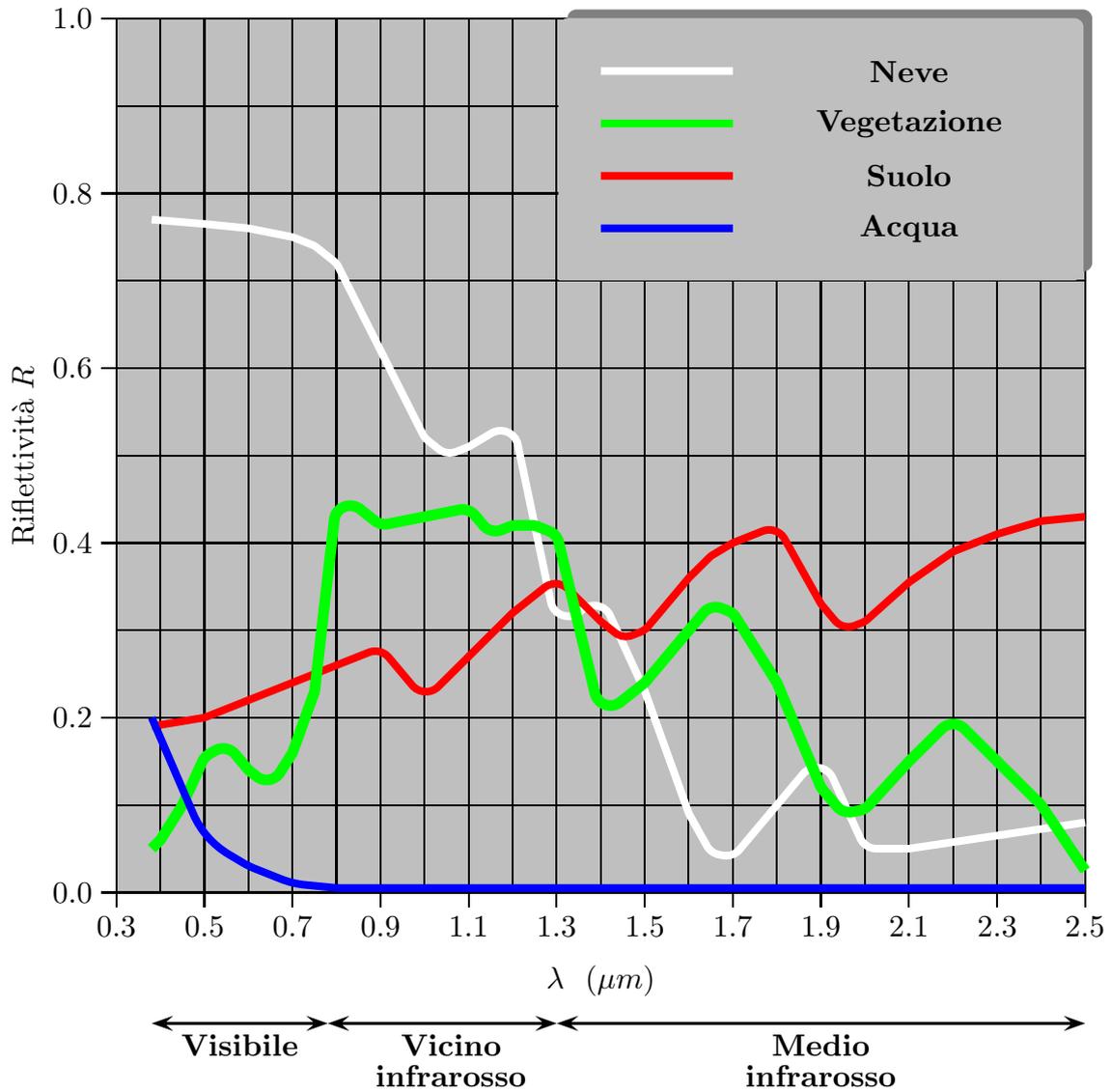


fig.30.6.3

¹⁾ <https://e-cours.univ-paris1.fr/html>: Signatures spectrales des principales surfaces naturelles.

30.7 - Segmento spaziale

Il mainframe del veicolo spaziale e l'elettronica associata montata a bordo del satellite costituiscono il segmento spaziale di una tipica missione satellitare di rilevamento a distanza. Svolge varie funzioni, tra cui l'imaging della terra in tutte le bande spettrali richieste, la formattazione dei dati del sensore del carico utile e la trasmissione alle stazioni di terra, fornendo l'energia necessaria per i sottosistemi mainframe e payload, fornendo la stabilità di assetto richiesta per l'imaging, fornendo informazioni di manutenzione per monitorare la salute dei satelliti e accettare i telecomandi per controllare il veicolo spaziale. Le specificazioni di un tipico segmento spaziale di un satellite per remote sensing possono essere ottenute dalla Tabella 1. Le specifiche del segmento spaziale IRS-1C sono mostrate in Tabella 2.

Tabella 1: Principali specifiche di una tipica stazione terrestre di ricezione satellitare di telerilevamento

Frequenza (MHz)	Banda X 8025-8400, Banda S 2200-2300
Antenna	Riflettore principale parabolico diametro 10m Subriflettore iperbolico diametro 1.5m
Alimentazione	Cassegrain Banda S e X in configurazione singolo canale monopulse
Polarizzazione	Configurabile RHCP/LHCP
Rapporto assiale (dB)	Banda X: 2, Banda S: 1.5

Tabella 2: Principali specifiche del segmento spaziale del satellite IRS-1C

Tipo	Satellite di telerilevamento stabilizzato con corpo a tre assi
Orbita	polare, sincrono al sole, 817 km di altitudine con tempo di attraversamento equatoriale alle 10:30 nel nodo discendente
Ripetività	341 orbite/24 giorni