

Equipaggiamento e armamento

Objekttyp: **Group**

Zeitschrift: **Rivista militare della Svizzera italiana**

Band (Jahr): **85 (2013)**

Heft 3

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

I satelliti militari (2° parte)

ING. FAUSTO DE MARCHI



Ing. Fausto De Marchi

Terminiamo in questo numero della rivista RMSI la seconda parte dell'articolo sui satelliti militari. La prima è stata pubblicata nel numero precedente (No 2), apparsa nel mese di marzo, il cui contenuto riteniamo sia conosciuto ai nostri lettori.

Questa seconda parte si focalizza sui satelliti di ricognizione, che rappresentano la maggioranza dei satelliti militari e che più c'interessano. Dopo un'introduzione, nella quale illustriamo le caratteristiche tecniche dei sensori (il cuore dei satelliti che determinano la qualità delle immagini), ci soffermiamo sui tre tipi di satelliti di ricognizione tuttora operativi. Diamo quindi una panoramica dei programmi più importanti curati da quei paesi che regolarmente impiegano satelliti di ricognizione per scopi militari e infine facciamo alcune considerazioni sul ruolo che un piccolo paese come la Svizzera può assumere in ambito spaziale.

Le fonti usate per redigere questi articoli sono elencate alla fine dello stesso.

Vogliamo tuttavia ringraziare in modo particolare il Dr. Erich Meier (Oberstlt Stab LW / A2, meier-fust@swissonline.ch) per il sostegno pratico, i preziosi suggerimenti e per alcune immagini messe a nostra disposizione, che ci hanno permesso di valorizzare lo scritto.

1. Introduzione

È utile anzitutto chiarire una questione puramente giuridica. Parlare di satelliti militari, in particolare di satelliti-spia, potrebbe far sorgere il dubbio che queste attività siano illegali e che violano norme internazionali sull'utilizzo dello spazio. Ma non è così. L'uso dello spazio extra-atmosferico è regolato dal trattato internazionale denominato "Outer Space Treaty" [1], siglato contemporaneamente nel gennaio 1967 dalle tre potenze USA, Russia e Gran Bretagna. Oggigiorno 101 paesi, tra i quali le maggiori potenze militari e industriali del mondo, hanno aderito al trattato. Mancano le firme di molti Stati africani, altri (pochi per la verità) hanno approvato il testo ma non l'hanno ratificato. Lo "Outer Space Treaty" è entrato in vigore il 10 ottobre 1967. Esso rappresenta il fondamento giuridico del diritto spaziale, sostiene alcuni principi basilari come la libertà d'esplorazione e d'utilizzo pacifico dello spazio, garantita in ugual modo a tutti gli Stati senza discriminazioni, nell'interesse comune e conformemente al diritto internazionale: un po' come furono stabilite, molti anni prima, le norme che regolano l'uso delle acque internazionali. L'articolo IV del trattato vieta esplicitamente agli stati firmatari di ... "collocare armi di distruzione di massa nell'orbita terrestre, condurre manovre o stabilire basi militari sulla luna o su altri corpi celesti". Dunque lo "Outer Space Treaty", proibendo unicamente le armi atomiche, chimiche e batteriologiche, permette indirettamente di collocare nello spazio extra-atmosferico armi convenzionali e, a maggior ragione, satelliti militari per l'osservazione della terra, nella maggioranza dei casi satelliti "passivi" e sempre disarmati. Lo dimostra anche il fatto che la messa in orbita di centinaia di satelliti-spia da oltre 40 anni non ha mai creato né conflitti diplomatici tra Stati avversari né crisi internazionali: tutto al contrario dello spionaggio eseguito con ricognitori o aerei-spia d'alta quota. A questo proposito va rilevato che (purtroppo) con lo "Outer Space Treaty" rimane irrisolto l'annoso quesito del confine verticale, a sapere cioè a quale quota si trova il passaggio tra lo spazio aereo, soggetto alle sovranità nazionali, a quello extra-atmosferico, di libero accesso a tutti gli Stati del mondo, inclusi soggetti privati e commerciali, organizzazioni scientifiche e militari.

Per quanto riguarda i satelliti militari di ricognizione è utile ricordare i seguenti 4 punti:

- Il successo dei satelliti di ricognizione è da ricondurre anzitutto a un fattore puramente tecnologico. I sensori, cioè il "cuore" di ogni satellite di ricognizioni, hanno conosciuto uno sviluppo e un perfezionamento tecnologico significativo e continuo negli anni. Si è passati dalle poche immagini in bianco e nero con risoluzioni modeste, scattate nei giorni soleggiate agli albori dell'era spaziale, a quelle a colori o con radar SAR ad alta risoluzione, scattate in ogni ora del giorno e della notte come pure in condizioni meteorologiche sfavorevoli. Un'evoluzione tecnologica durata decenni e che ha destato ovviamente un sempre più forte interessamento da parte militare.

- La ricognizione dallo spazio non è continua nel tempo. Si può ottenere in questo istante l'immagine di una zona particolarmente interessante, la prossima immagine della stessa aerea si otterrà soltanto fra qualche ora, nei casi più favorevoli. Per ottenere un controllo permanente di vaste aeree della terra vi sono i satelliti di sorveglianza, che in generale ruotano in orbite geostazionarie.
- La qualità delle immagini provenienti da satelliti civili d'osservazione terrestre ha tenuto il passo con quelle militari di ricognizione. In generale se le immagini "militari" sono ottime, quelle "civili" lo sono un po' meno, ma pur sempre molto buone. Di conseguenza, in situazioni di conflitto e all'eventuale mancanza d'immagini adeguate da parte di satelliti militari, i comandanti possono far capo a immagini provenienti da satelliti civili senza subire per questo grossi svantaggi. Ma vi è una differenza importante: la sicurezza dei dati. Nel caso militare essi sono criptati e più sicuri, non così per quelli civili.
- Le caratteristiche tecniche, i modi di funzionare e soprattutto le prestazioni di satelliti militari di ricognizione sono informazioni classificate segrete: ma grazie ad analoghi programmi civili (vedi punto precedente), spesso le prestazioni di quelli militari si possono stimare con buone approssimazioni.

2. I tipi di sensori

Un satellite militare per la ricognizione è un mezzo per il telerilevamento della terra. Il termine di "telerilevamento" indica quell'insieme di tecniche, strumenti e software che permettono d'aumentare le capacità percettive dell'occhio umano fornendo informazioni su oggetti posti a distanza. Il telerilevamento utilizza i "sensori", strumenti che captano la radiazione elettromagnetica riflessa o emessa dalla superficie terrestre e la convertono in segnali interpretabili. I sensori operano in determinate lunghezze d'onde (o frequenze) nel vasto spettro elettromagnetico e subiscono limitazioni inevitabili, dettate dalle leggi della fisica quantistica. Oggigiorno nei satelliti di ricognizione si usano tre tipi di sensori, a quali corrispondono strumenti di bordo molto diversi uno dall'altro.

Le radiazioni elettromagnetiche sono l'insieme di onde caratterizzate da una loro lunghezza e quindi da una loro frequenza. Poiché la lunghezza d'onda e la frequenza di una radiazione sono inversamente proporzionali, quanto minore sarà la lunghezza d'onda tanto maggiore sarà la sua frequenza. Un intervallo particolare delle radiazioni elettromagnetiche, cioè tra una determinata frequenza minima e un'altra massima, si chiama spettro (continuo) a banda di frequenza. Le radiazioni elettromagnetiche sono state suddivise in bande di frequenza, stabilite a partire da quella particolare dell'occhio umano, detto spettro ottico o visivo. Come l'orecchio ha dei limiti nella percezione del suono, anche l'occhio umano ha dei limiti nella visione della luce. In entrambi i casi, vi sono limiti superiori e inferiori, ma non sono dei limiti netti.

Un altro fattore che gioca un ruolo fondamentale nei sensori dei satelliti è l'assorbimento o opacità delle onde elettromagnetiche attraverso l'atmosfera (o inversamente la loro permeabilità). Questo effetto fisico dipende in primo luogo dalla lunghezza delle onde elettromagnetiche. L'opacità atmosferica nello spettro ottico è bassa (aumenta però con la presenza del vapore acqueo), nelle frequenze usate dalle stazioni radio è in pratica inesistente, mentre per i raggi gamma l'opacità atmosferica è quasi totale, ciò che permette all'uomo (per fortuna) di proteggersi dai raggi cosmici molto nocivi per la nostra salute.

Come noto le lunghezze d'onde negli spettri elettromagnetici (che si spostano alla velocità della luce cioè all'incirca con 300'000 km/s) si misurano in metri (m) con i loro multipli, specialmente verso il basso. Inversamente le frequenze si misurano in Hertz (Hz) con i loro multipli, specialmente verso l'alto.

Lunghezza d'onda	<i>corrisponde</i>	Frequenza
1 km (chilometro) = 10^3 (m) = 1'000 (m)		300 kiloHz (KHz) = 300 mila Hz = 3×10^5 (Hz)
1 m (metro)		300 megaHz (MHz) = 300 milioni Hz = 3×10^8 (Hz)
1 mm (millimetro) = 10^{-3} (m) = 0.001 (m)		300 gigaHz (GHz) = 300 miliardi Hz = 3×10^{11} (Hz)
1 μ m (micro) = 10^{-6} (m) = 0.000001 (m)		300 teraHz (THz) = 3×10^{14} (Hz)
1 nm (nano) = 10^{-9} (m) = 0.000000001 (m)		300 petaHz (PHz) = 3×10^{17} (Hz)
1 pm (pico) = 10^{-12} (m) = 0.000000000001 (m)		300 exaHz (EHz) = 3×10^{20} (Hz)

Esempi:

- Radio FM della Rete 1 a Lugano: frequenza 88.1 (MHz) / lunghezza d'onda 3.40 (m)
- Velocità clock di un microprocessore: frequenza 4 (GHz) / lunghezza d'onda 75 (mm)
- Luce rossa: frequenza 400 (THz) / lunghezza d'onda 0.00075 (mm)
- Raggi X: frequenza 30 (PHz) / lunghezza d'onda 0.000001 (mm)

I sensori che operano nelle diverse lunghezze d'onda si suddividono pressappoco come indicato dalla tabella 1:

Tipo di onda elettromagnetica		Lunghezza d'onda	Frequenza
Raggi Gamma		< 0.03 (nm)	> 10 (EHz)
Raggi X (o Röntgen)		0.03 (nm) – 0.29 (µm)	10 (EHz) – 1.03 (PHz)
Ultravioletto (UV)	UVB	0.29 (µm) – 0.32 (µm)	1.03 (PHz) – 937 (THz)
	UVA	0.32 (µm) – 0.40 (µm)	937 (THz) – 750 (THz)
Visibile (spettro ottico)		0.40 (µm) – 0.72 (µm)	750 (THz) – 416 (THz)
Infrarosso (IR)	IR vicino	0.72 (µm) - 1.30 (µm)	416 (GHz) – 230 (THz)
	IR medio	1.30 (µm) – 3.00 (µm)	230 (THz) – 100 (THz)
	IR lontano	3.00 (µm) – 1 (mm)	100 (THz) – 300 (GHz)
Microonde		1 (mm) – 30 (cm)	300 (GHz) – 100 (MHz)
Onde radio		> 30 (cm)	< 100 (MHz)

Tabella 1

Lo spettro ottico a noi visibile (contenenti tutti i colori dell'iride) è compreso tra le lunghezze d'onda di 0.72 (µm) (= rosso) e lo 0.40 (µm) (= violetto). La tabella evidenzia che lo spettro infrarosso (IR), a noi invisibile, è compreso tra il limite superiore di 1 (mm) e quello inferiore di 0.72 (µm): esso è suddiviso in tre parti ineguali: IR "vicino" (allo spettro visibile), "medio" e quello "lontano". Lo spettro ultravioletto (UV), pure a noi invisibile, è compreso tra le lunghezze d'onda 0.4 (µm) e 0.29 (µm) ed è suddiviso in due parti ineguali: UVA e UVB. La radiazione ultravioletta produce l'abbronzatura, ma la prima (UVA) è la maggiore responsabile del cancro della pelle.

È utile approfondire l'effetto dell'opacità (assorbimento) dei gas che formano l'atmosfera nelle bande d'onde elettromagnetiche tipiche dei sensori, poiché la dipendenza di questo effetto dalle lunghezze d'onde è spesso "altalenante", come mostra la figura 1.

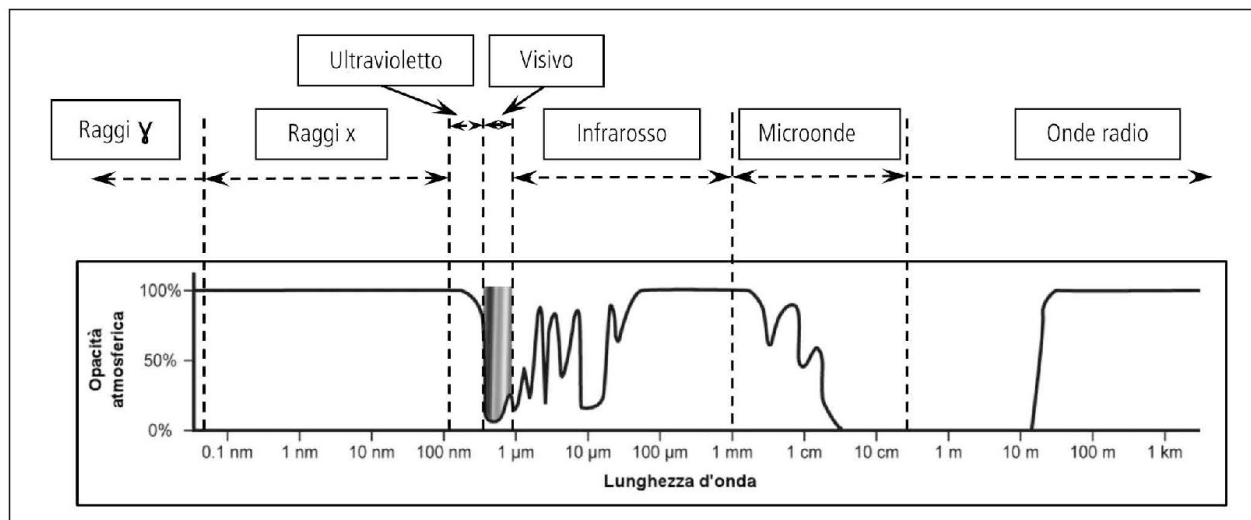


Figura 1

Il 100% d'opacità sta a indicare che per queste lunghezze d'onda l'assorbimento atmosferico è totale. Ciò avviene in particolare per tutti i raggi gamma, raggi x, lo spettro dell'ultravioletto, lo spettro dell'infrarosso oltre i 20 (µm) di lunghezza d'onda, in parte anche nello spettro delle microonde e delle onde radio oltre i 10 (m) di lunghezza. Nessun sensore nello spazio riuscirebbe a "vedere" il suolo terrestre se operasse in queste lunghezze d'onde. Per inciso rileviamo che oggi esistono molti satelliti scientifici per lo studio di stelle, galassie, del sole o di altri pianeti. Essi utilizzano sensori nelle bande di frequenze sopra indicate, come ad esempio i raggi x, l'ultravioletto, raggi gamma ecc. Poiché tra il satellite e l'oggetto osservato non vi è l'atmosfera ma il vuoto assoluto, il sensore non subisce alcun effetto d'opacità. Se lo stesso strumento fosse rivolto verso la terra, non potrebbero osservare nulla del nostro pianeta. Lo 0% d'opacità della figura 1 indica invece una situazione molto favorevole all'osservazione della terra: vedi i diversi "avvallamenti" della curva. Come mostrato dalla figura, queste situazioni si riscontrano nello spettro visivo, in alcune particolari lunghezze d'onda nello spettro infrarosso, nelle microonde e in parte nelle onde-radio.

Da queste considerazioni si deduce che i satelliti militari per la ricognizione utilizzano tre tipi diversi sensori: vedi figura 2. Va sottolineato che spesso un satellite militare non è dotato di un solo sensore, ma di due a volte anche di tre tipi, diversi uno dall'altro, allo scopo d'aumentare la sicurezza e la disponibilità delle informazioni.

- **Sensori ottici:** attivi nel visivo e nell'infrarosso "vicino", tra 0.4 (μm) e 1.3 (μm). Essi sono "passivi", in quanto utilizzano soltanto la luce del sole riflessa degli oggetti al suolo, senza emettere loro stessi delle radiazioni. Poiché sono sensibili anche nella banda di frequenze dell'infrarosso "vicino", essi "vedono" pure oggetti o dettagli che il nostro occhio non riesce a percepire. In concreto si tratta di telecamere speciali in bianco – nero o a colori. L'impiego dei sensori ottici è di regola possibile unicamente nelle ore diurne e con una buona illuminazione solare.
- **Sensori termici o IR:** attivi nell'infrarosso "medio", tra 1.30 (μm) e 3.00 (μm), e in quello "lontano", tra 8 (μm) e 14 (μm). Anche questi sensori sono "passivi", in quanto captano le radiazioni termiche emesse dagli oggetti al suolo. Si tratta di camere termiche che "vedono" anche oggetti e dettagli che il nostro occhio non riesce a percepire. Poiché la sensibilità di questi strumenti è data dalle differenze di temperature tra gli oggetti e lo sfondo, essi sono impiegati soprattutto di notte. Va notato che, per aumentare la sensibilità di questi sensori, molte volte essi sono raffreddati a gas (un po' come un congelatore) raggiungendo temperature molto basse, dell'ordine di -200° .
- **Sensori radar:** operano in diverse bande di frequenze nelle microonde e onde radio, tra 5 (cm) e 10 (m). Questi sistemi di ricognizione sono "attivi", in quanto emettono una radiazione elettromagnetica, "illuminano" cioè il territorio sottostante e gli oggetti d'interesse, i quali riflettono una parte della radiazione incidente, che a loro volta è captata dal ricevitore satellitare, analizzata ed elaborata elettronicamente. A dipendenza delle missioni previste si possono usare diverse frequenze per il radar, sempre però nella banda tra 5 (cm) e 10 (m). Il vantaggio principale di questo tipo di sensore è tattico: può essere impiegato a ogni ora del giorno e con qualsiasi situazione meteorologica.

La figura 2 mostra le bande di frequenze utilizzate dai sensori dei satelliti per la ricognizione terrestre.

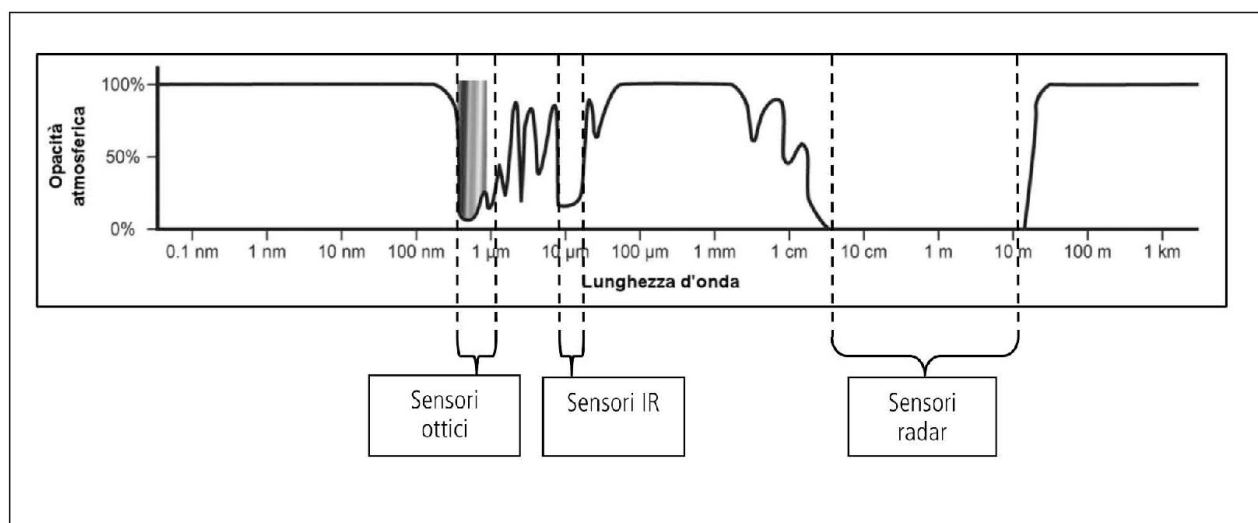


Figura 2

3. La risoluzione

Un parametro di capitale importanza per giudicare la qualità dei sensori è la risoluzione delle immagini, indipendentemente che essi provengano da sensori ottici, IR o radar. Semplificando al massimo, la risoluzione dell'immagine rappresenta il dettaglio più piccolo che si può visualizzare: si misura in metri o centimetri. Più precisamente, nelle immagini digitali la risoluzione definisce la dimensione di ogni pixel che compongono l'immagine. A parità d'altri parametri, come grandezza dei sensori o ingrandimento ottico, tanto più grande è il numero di pixel tanto più l'immagine mostrerà dettagli. Gli esperti dei sensori distinguono tuttavia almeno tre tipi di risoluzioni: quella spaziale, radiometrica e spettrale. Definizioni assai complicate, che tengono conto dell'energia emessa dai singoli oggetti in ogni banda di frequenze e che mostrano una chiara interdipendenza. È la combinazione delle varie risoluzioni che permette d'ottenere i migliori risultati. Un'alta risoluzione spaziale comporta spesso un peggioramento delle altre due. Un progettista di sensori è quindi spesso

Equipaggiamento e armamento

confrontato con il problema di trovare dei compromessi nella scelta delle singole componenti affinché la risoluzione complessiva porti all'ottenimento delle migliori immagini possibili.

Nella valutazione delle immagini si sono definiti 5 livelli, tutti riconducibili a diversi valori della risoluzione e che permettono di classificare le informazioni in esse contenute.

- Livello 1: rilevare (o scoprire)

Corrisponde al livello più basso. Il sensore ha rilevato qualcosa d'interessante, che si distingue dallo sfondo dell'immagine, ma non si riesce a capire di cosa si tratti. È come se si scoprisse, ad esempio, una "macchia" nell'immagine di una strada, ma non si riesce a capire in che cosa consiste (veicolo, macigno, grosso buco?).

- Livello 2: riconoscere

Corrisponde a un livello di dettagli nettamente superiore rispetto al primo. Nell'esempio precedente: il sensore riesce a riconoscere un veicolo (perché si vedono delle ruote), ma non si riesce a stabilire se si tratta di un'automobile, un trattore, un camion o un altro mezzo.

- Livello 3: identificare

A questo livello di dettagli l'oggetto è identificato in modo univoco. Si tratta di un'automobile, sicuramente non di un trattore e nemmeno di un carro granatieri ruotato.

- Livello 4: descrivere

Il numero di dettagli è così elevato da poter descrivere l'oggetto. L'automobile è di tipo station wagon, ha 4 porte laterali e un solo specchietto retrovisore.

- Livello 5: analizzare

Corrisponde al livello più alto. Il sensore ha rilevato talmente tanti dettagli da poter descrivere l'oggetto con molta precisione. Ad esempio l'auto è una Hyundai, modello i40, un finestrino è abbassato, la targa è TI xyz.

Si è poi cercato di correlare i livelli di dettaglio per alcuni oggetti particolari con la risoluzione metrica di un sensore, come mostra la tabella 2. I valori indicati della risoluzione in metri, sono però molto approssimativi, da ritenere quindi come ordini di grandezza.

		Livello				
		1	2	3	4	5
Risoluzione	Oggetto	scoprire	riconoscere	identificare	descrivere	analizzare
	Linea ferroviaria	30.00 (m)	15.00 (m)	6.00 (m)	1.50 (m)	0.60 (m)
	Strada	9.00 (m)	6.00 (m)	1.80 (m)	0.60 (m)	0.15 (m)
	Imbarcazione	7.60 (m)	4.60 (m)	0.60 (m)	0.30 (m)	0.08 (m)
	Veicolo militare	4.50 (m)	1.50 (m)	0.90 (m)	0.15 (m)	0.03 (m)
	Stazione radar	3.00 (m)	0.90 (m)	0.30 (m)	0.15 (m)	0.04 (m)
	Postazione missili	3.00 (m)	1.50 (m)	0.80 (m)	0.25 (m)	0.03 (m)
	Posto di comando	3.00 (m)	1.50 (m)	0.70 (m)	0.15 (m)	0.03 (m)
	Veicolo militare	1.50 (m)	0.60 (m)	0.30 (m)	0.05 (m)	0.03 (m)

Tabella 2

Si osservi che le esigenze d'informazioni militari richiedono solo in casi eccezionali immagini così dettagliate fino a raggiungere il livello 5. Nella maggioranza dei casi l'identificazione di oggetti (livello 3), o al massimo la loro descrizione (livello 4), sono più che adeguate per riconoscere una determinata situazione, sia sul piano tattico sia su quello strategico. In conformità a questo livello d'informazione un comandante è generalmente in grado di prendere decisioni con sufficienti cognizioni di causa.

La figura 3 mostra l'importanza della risoluzione nella ricognizione d'oggetti. Si tratta di 4 immagini dello stesso oggetto (un caccia F-5 "Tiger" al suolo) eseguite con 4 diverse risoluzioni.

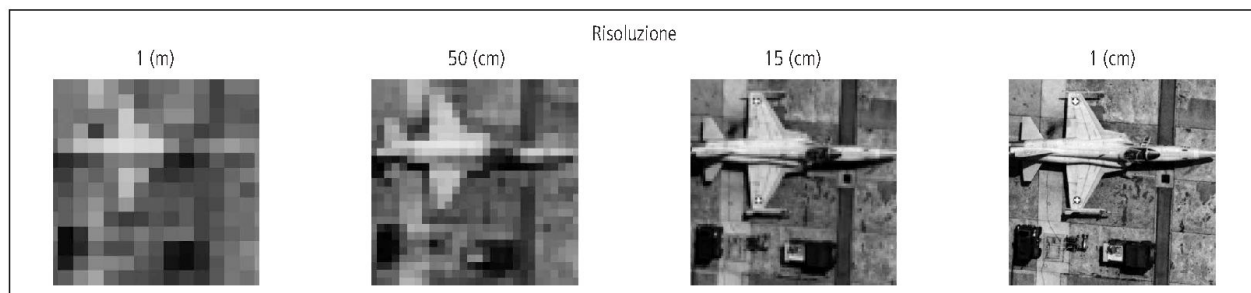
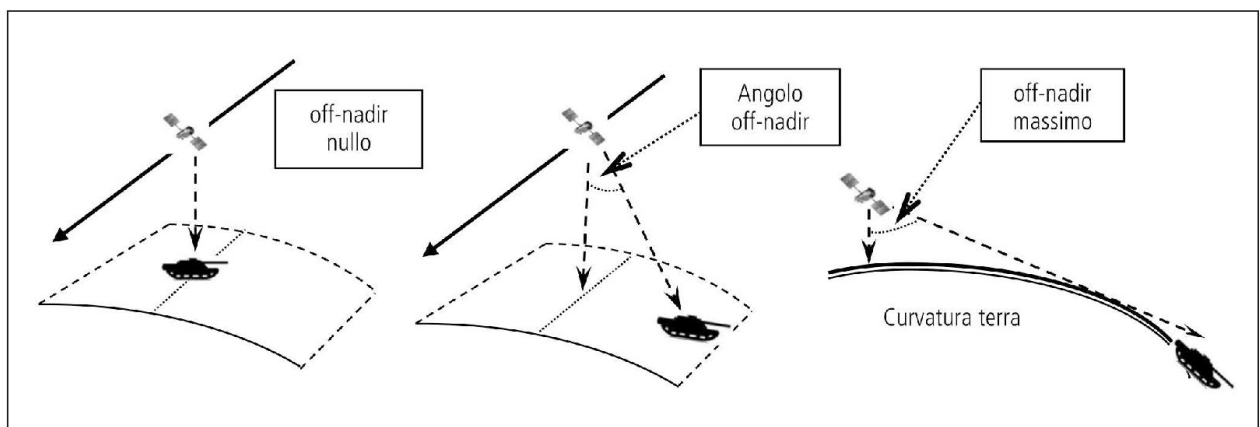


Figura 3

Solo con le immagini ad alta risoluzione (vedi quella di 1 cm) si riescono a stabilire con certezza alcune particolarità. Ad esempio che il cockpit non è occupato dal pilota, ma la scaletta è appoggiata alla fusoliera, che il tettuccio (canopy) è aperto, che si sta armando il caccia con missili aria-aria AIM-9 Sidewinder (sull'ala destra un missile è già stato installato, su quella di sinistra non ancora) ecc.

Le migliori immagini di un oggetto si ottengono quando il satellite di ricognizione sorvola l'oggetto sulla verticale, cioè passa "sopra la testa" dell'oggetto. Questa situazione particolare è conosciuta come "nadir": vedi figura 4a. L'angolo tra la verticale del satellite e la linea che congiunge il satellite con l'oggetto è chiamato angolo "off-nadir": nel caso di un passaggio sulla verticale l'angolo "off-nadir" è nullo. Nei passaggi successivi, a causa della rotazione terrestre, l'oggetto non si troverà più sulla verticale del satellite ma spostato lateralmente: vedi figura 4b. L'angolo "off-nadir" non è più nullo. Se esso supera un certo valore critico, la ricognizione diviene difficile. Per sistemi di ricognizione ottici o nello spettro infrarosso l'angolo "off-nadir" critico si aggira sui 30°. Superata questa soglia, l'effetto dell'assorbimento atmosferico diviene sempre più importante ciò che deteriora rapidamente la qualità delle immagini. Lo stesso accade con i sistemi di ricognizione radar ma in questi casi l'angolo "off-nadir" critico è più elevato e può arrivare sui 60°.



Da sinistra: figure 4a, 4b e 4c

Dal punto di vista strettamente militare assume inoltre un ruolo essenziale, il numero di sorvoli giornalieri sopra gli oggetti o l'area da tenere sotto controllo e da monitorare. In generale si desidera osservare l'oggetto d'interesse il più frequentemente possibile, ma ciò ha dei limiti concreti. Un satellite di ricognizione in orbita bassa impiega circa 90 minuti per ruotare attorno alla terra. A ogni passaggio l'angolo "off-nadir" cresce, ciò che deteriora la qualità delle immagini (vedi sopra). Esso poi raggiunge, dopo alcune orbite, il suo valore massimo oltre al quale l'osservazione dell'oggetto non è più possibile poiché l'oggetto rimane "nascosto" sotto l'orizzonte originato dalla curvatura terrestre: vedi figura 4c. Per soddisfare questa richiesta militare l'unica soluzione è l'aumento del numero dei satelliti in orbita. Alle nostre latitudini medio-europee (40° - 50°) con due satelliti, ambedue in orbite basse, si arriva a sorvolare un'area d'interesse una volta ogni 6 ore circa, con tre satelliti ogni 4 ore. Se si volesse ottenere un'osservazione ogni 15 minuti si dovrebbe mettere in orbita una costellazione di almeno 24 satelliti su 4 o 6 orbite differenti: una costellazione simile a quella realizzata dagli Stati Uniti per la navigazione satellitare GPS. Un'esigenza che si può senz'altro soddisfare, ma che si scontra ovviamente con dei costi elevati.

4. I sistemi ottici

I sistemi ottici sono strumenti fotosensibili nel campo delle lunghezze d'onde visive e in quelle dell'infrarosso "vicino", cioè in pratica tra lo 0.4 (μm) e 1.3 (μm). Questi sistemi "vedono di più" dell'occhio umano in quanto, per le lunghezze d'onda superiori allo 0.72 (μm) i nostri occhi non rilevano nulla. Come ricordato in precedenza, si tratta di sistemi completamente passivi (non emettono radiazioni), ma operano con successo soltanto quando l'aerea e gli oggetti sono ben illuminati dai raggi del sole, quindi esclusivamente di giorno e con il bel tempo.

I sistemi ottici sono stati i primi a essere impiegati nei satelliti di ricognizione e lo sono tuttora. La tecnologia è però radicalmente mutata. Fino al 1985 circa fu usata la tecnica analogica della pellicola fotosensibile, messa a punto soprattutto negli Stati Uniti, ed è ancora impiegata, almeno in parte, nei satelliti-spia russi e cinesi. Da quella data in poi si è percorsa la strada della telecamera digitale. I due scopritori della tecnologia riguardante l'immagine digitale, Willard Boyle e George Smith, hanno ricevuto il premio Nobel della fisica nel 2009, un riconoscimento tardivo ma pur sempre un bel riconoscimento. Vi è una forte analogia tra i sistemi ottici usati nelle telecamere di un satellite e l'occhio umano. Anzitutto i sistemi ottici sono dotati di un insieme di lenti (una decina in totale) per ingrandire

e focalizzare le immagini captate: per analogia questa funzione è svolta dalla pupilla e dal cristallino. Oggigiorno la stragrande maggioranza degli strumenti ottici in questi satelliti usa la tecnologia CCD (Charge Coupled Device), la stessa è presente in una normale fotocamera digitale. Il CCD è un sensore ottico che corrisponde alla retina dell'occhio umano. È un dispositivo fotosensibile costituito da una matrice di fotodiodi in grado di trasformare un segnale luminoso in un segnale elettrico di tipo analogico: ciò corrisponde al nervo ottico che trasporta i segnali nervosi alle parte predisposte per la vista del nostro cervello. Nei CCD gli impulsi elettrici vengono però trasformati da analogici in digitali da un convertitore esterno al sensore. Il cervello umano contiene oltre 100 milioni di punti sensibili per memorizzare i singoli impulsi sensoriali. Nei sistemi ottici i singoli impulsi vanno a caricare elettricamente l'unità di memoria più piccola del sensore: il pixel, che rappresenta quindi la più piccola porzione d'immagine che il sensore ottico è in grado di catturare. Analogamente al nostro cervello anche i pixel nei CCD di satelliti per la ricognizione sono moltissimi, svariati milioni. Questi ultimi sono disposti su una griglia o matrice quadrata, composta di un numero elevato di righe orizzontali e colonne verticali. Tipicamente una sola riga della matrice è costituita da 24'000 pixel. Le dimensioni fisiche di un sensore ottico sono molto contenute (pochi centimetri) poiché un singolo pixel è microscopico. Le immagini di un satellite militare per la ricognizione possono essere in bianco e nero oppure a colori. In quest'ultimo caso è necessario munire il sensore di un filtro a mosaico che cattura una delle tre componenti cromatiche primarie della luce, cioè il rosso, il blu e il verde a cui si aggiunge l'infrarosso "vicino". A questo punto i dati digitali nei singoli pixel sono in forma "grezza", vengono quindi memorizzati in un file per una successiva elaborazione digitale. Quest'ultima consiste in una mescolanza additiva delle componenti primarie della luce (attraverso un procedimento matematico interno), quindi rende compatibili i dati con i normali formati di visualizzazione delle immagini digitali (jpg, tif, gif, ecc.) e memorizza il file elaborato in una memoria a stato solido, pronto per essere trasmesso al suolo una volta criptato.

Il procedimento non è dei più semplici, ma è ampiamente collaudato, poiché molto simile a quello usato dai normali apparecchi fotografici digitali.



Figura 5

Figura 5 mostra un'immagine ad alta risoluzione della città di Zurigo scattata il 18 agosto 2002 dal satellite commerciale per il telerilevamento QuickBird della Società DigitalGlobe (QuickBird 2001-047A): vedi [2]. La fotografia (l'originale è a colori) è stata scattata da 600 (km) d'altezza. Il sistema raccoglie dati pancromatici con una risoluzione di 60 (cm) e dati stereoscopici multispettrali con una risoluzione di 2.4 metri.

QuickBird è stato progettato per coprire con grande precisione ed efficienza aree molto estese. I valori delle risoluzioni del QuickBird sono tipici dei satelliti commerciali per il telerilevamento terrestre. Satelliti militari di ricognizione con sistemi ottici, si suppone, abbiano una risoluzione da 3 a 5 volte migliore.

Esperti ritengono tuttavia che una risoluzione al suolo di 20 (cm) rappresenti un valore limite per tutti i sistemi ottici oggi a disposizione: ottenere in futuro risoluzioni migliori sarà perciò difficile. Un altro serio problema nei satelliti di ricognizione con sistemi ottici è la trasmissione dei dati al suolo in tempo reale. Se si ammette una risoluzione al suolo di 20 (cm), una velocità di volo del satellite in orbita attorno ai 7.5 (km/s) significa che il sensore CCD deve essere "letto" 40'000 volte al secondo. Se la matrice possiede 24'000

pixel su ogni riga (codificati in 8 bit) il flusso di dati da trasmettere raggiunge i 900 MBytes al secondo per ognuno dei quattro canali (rosso, blu, verde e infrarosso vicino). Memorizzare questi dati su un supporto informatico nel satellite per poi inviarli al suolo in un secondo tempo non rappresenta alcun problema; lo è invece se si desidera trasmetterli (compressi e criptati) in tempo reale a una stazione terrestre. Una soluzione di ripiego è quella d'utilizzare la capacità di trasmissione dati di un satellite per le telecomunicazioni, ammesso che uno di questi orbitasse nelle vicinanze e sia visibile dal ricognitore.

5. I sistemi IR

Come i sensori ottici anche quelli infrarossi sono passivi: non emettono cioè alcuna radiazione, ma captano l'energia emessa da oggetti nelle lunghezze d'onda tra 8 – 14 (μm), alcune volte anche tra 3.5 – 5.0 (μm). L'energia captata è termica (non luminosa). I sensori IR reagiscono a differenze di temperatura, anche minime, tra più oggetti vicini o tra oggetti e lo sfondo uniforme.

Quanto più alta è la temperatura dell'oggetto tanto più facilmente esso sarà rilevato dal sensore, tuttavia non nel valore assoluto (non è un termometro che misura la temperatura di un corpo) ma come differenza rispetto ad altri oggetti. Sono sufficienti differenze di temperature dell'ordine di 0.05°K per essere rilevate dai sensori termici. Inoltre l'emissione termica tra oggetti dipende da un coefficiente d'emissione che è una caratteristica del materiale dell'oggetto. A parità di temperatura i sensori rilevano più facilmente oggetti che presentano coefficienti d'emissione più elevati. Ad esempio se una casa e un carro armato hanno ambedue una temperatura sulle loro superfici di 25°C , un sensore IR rileverà più facilmente il carro armato, poiché il coefficiente d'emissione dell'acciaio è più alto di quello del mattone.

I sistemi di ricognizione che si basano su questo tipo di sensori hanno il vantaggio di operare anche di notte. Ma hanno lo svantaggio che la loro risoluzione spaziale è modesta, un fattore 5 volte peggiore rispetto a quello ottico. Anche nei più raffinati satelliti di ricognizione IR non si riesce (per ora) a ottenere risoluzioni spaziali inferiori ai 15 - 20 metri.

Per illustrare alcuni effetti tipici dei sensori IR riportiamo un paio di fotografie.

Nella prima, figura 6, sono rappresentata due immagini della stessa regione rurale scattate dal satellite GeoEye-1. L'immagine di sinistra mostra la regione fotografata nel visivo, in quella di destra nell'infrarosso "vicino". È evidente, nell'immagine all'infrarosso, come il contrasto sia molto accentuato: zone all'ombra, più fredde, sono molto scure, mentre quelle al sole, quindi con una più forte emissione termica, sono molto chiare. Inoltre un confronto tra l'immagine di sinistra (visivo) e quella di destra (IR) mostra come alcuni piccoli dettagli nell'infrarosso non siano più riconoscibili, a causa della minor risoluzione spaziale.



Figura 6

La seconda immagine (vedi figura 7) rende evidente un aspetto curioso ma caratteristico delle immagini all'infrarosso.

Si tratta di una mediocre immagine IR di un aereo al suolo (nuovamente un F-5 "Tiger"), che si riconosce a malapena sulla parte sinistra della fotografia. La curiosità sta sulla destra, dove s'intravede una macchia scura dalla sagoma simile a quella di un altro F-5. In realtà l'aereo di destra non c'è: è decollato alcuni minuti prima. La macchia scura non è altro che la parte del suolo (cemento) più freddo rispetto alle parti più calde circostanti. Il raffreddamento del suolo è stato causato dall'ombra dell'aereo rimasto al sole per un lungo periodo.

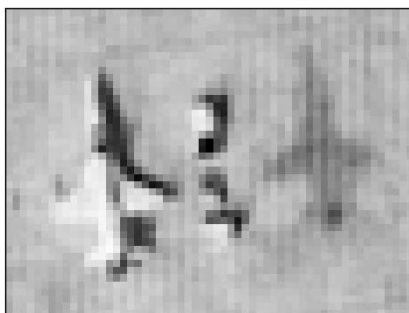


Figura 7

Le immagini IR si ottengono in generale in gradazioni di grigio: a ogni tonalità di grigio corrisponde l'emissione di radiazioni termica registrata dal sensore in una determinata banda di frequenza. Per ottenere immagini IR a colori si usa il procedimento del "falso colore", un artificio dell'utente per colorare immagini a posteriori, ma con risultati a volte poco soddisfacenti.

La mediocre risoluzione spaziale limita molto l'impiego di sensori IR in satelliti militari di ricognizione, specialmente a livello tattico. È possibile rilevare un oggetto al suolo, forse riconoscerne la natura, ma è difficile se non impossibile identificarlo e ancor meno descriverlo o analizzarlo, come mostra la figura 7. Per contro questa strumentazione satellitare a immagini IR è molto utilizzata a livello strategico: ad esempio per il monitoraggio d'impianti industriali, nel rilevare dispiegamento di uomini e d'armi di notte, per il controllo della produzione d'energia oppure ancora per i problemi ecologici o gravi inquinamenti.

6. I sistemi radar (SAR)

Il punto debole nei due sistemi di ricognizione precedenti è senz'altro la loro dipendenza della situazione meteorologica. In caso di copertura nuvolosa l'osservazione della terra dallo spazio da parte dei sensori ottici e IR non è possibile; e ciò capita frequentemente. Ad eccezione dell'Africa del Nord, dell'Arabia Saudita, della Groenlandia, parte dell'Australia e del Sudafrica, tutte le altre regioni del mondo possono essere coperte da uno strato nuvoloso durante lunghi periodi. Si è potuto verificare statisticamente sull'arco di 8 anni, che i nostri cieli in media sono coperti da nuvole oltre il 50% del tempo. Se aggiungiamo le ore notturne senza l'illuminazione solare, ci si rende conto che i satelliti di ricognizione con sensori ottici e IR possono essere impiegati al massimo durante il 30% del tempo. Un valore deludente (e inefficiente se riportato ai costi dei sistemi) che ha spronato le nazioni industrializzate a sviluppare dei sensori utilizzabili 24 ore su 24 e con qualsiasi meteo (o quasi).

Da questa esigenza sono nati i sensori di tipo radar, nella banda di frequenza tipica delle microonde e (in parte) delle onde-radio. L'idea d'ottenere immagini da un radar è nata molti anni fa, addirittura attorno al 1955, ma soltanto negli ultimi 20 anni questa idea si è attuata con la realizzazione di un radar particolare chiamato SAR, acronimo di "Synthetic Aperture Radar", tradotto in italiano con "radar ad apertura sintetica". Questo grosso ritardo è dovuto al fatto che soltanto in anni recenti si è arrivati a sviluppare processori per l'elaborazione digitale delle immagini radar efficienti e soprattutto veloci.

Come ricordato nel capitolo 2, questo tipo di sensore è "attivo", cioè emette onde elettromagnetiche e capta e analizza le onde riflesse dagli oggetti. Lo spettro di frequenze teorico è compreso tra le 6 GHz (corrispondente a una lunghezza d'onda di 5 cm) e le 30 MHz (10 m). Questo vasto spettro gode della proprietà di non subire alcun effetto d'assorbimento atmosferico (vedi figura 2). Però non tutto questo spettro elettromagnetico è adatto ai radar SAR. Le frequenze comprese tra 35 GHz (circa 8.5 mm) e 94 GHz (corrispondente a circa 3 mm) vengono fortemente influenzate dalle precipitazioni atmosferiche. In questa banda di frequenze le gocce d'acqua della pioggia e i fiocchi di neve riducono drasticamente la portata di un radar. A nostra conoscenza nessun ricognitore satellitare opera all'interno della banda di frequenza sopra indicata.

Indichiamo nella tabella 3 le frequenze (o lunghezze d'onda) più usate dai SAR, militari e civili.

Sigla delle bande	Banda di frequenza		Banda lunghezza d'onda		Valore tipico
	minima	massima	massima	minima	
L	0.39 (GHz)	1.55 (GHz)	76.9 (cm)	19.3 (cm)	23.0 (cm)
S	1.55 (GHz)	4.20 (GHz)	19.3 (cm)	7.1 (cm)	10.0 (cm)
C	4.20 (GHz)	5.75 (GHz)	7.1 (cm)	5.2 (cm)	5.6 (cm)
X	5.75 (GHz)	10.9 (GHz)	5.2 (cm)	2.7 (cm)	3.0 (cm)

Tabella 3

Le sigle delle bande di frequenze (L, S, C, X) sono state introdotte agli albori della tecnologia radar, quindi durante la Seconda guerra mondiale, e utilizzate tuttora dagli specialisti. Abbiamo considerato le 4 bande di frequenze separatamente poiché ognuna presenta delle caratteristiche diverse. Ad esempio l'ultima (banda X) è quella che permette d'ottenere le immagini a più alta risoluzione, ma le sue onde elettromagnetiche hanno una capacità ridotta di penetrare tra le foglie degli alberi di un bosco oppure superare lo strato di nuvole in caso di forti piogge o di neviccate. Al contrario la banda L presenta la peggiore risoluzione, ma riesce a superare meglio le difficoltà ambientali sopra descritte. Le altre bande di frequenze S e C si trovano a "metà strada" tra le due precedenti. Ad esempio la banda C ha una risoluzione mediocre, ma una buona capacità di penetrazione in caso di neviccate, un po' meno in caso di forti piogge e male se deve penetrare tra le foglie di una foresta. Vedi a proposito [3]. Oggigiorno sono utilizzate per il telerilevamento dallo spazio tutte e quattro le bande di frequenza. La più usata è la banda X (specialmente attorno ai 9.6 GHz), ma la scelta finale è dettata in primo luogo dalla missione assegnata al satellite.

Il SAR è uno strumento costituito da un radar di tipo convenzionale con un'antenna puntata verso la terra, lateralmente rispetto alla direzione di volo del satellite. L'angolo "off-nadir" è di solito compreso tra i 20° e 80°. Il SAR, durante il volo del satellite, emette degli impulsi (coerenti) con una frequenza di ripetizione variabile tra poche centinaia fino ad alcune migliaia di Hz. Il SAR scansiona così una striscia rettangolare di terreno su una determinata larghezza, che può variare tra i 10 e i 500 (km). Molte volte il satellite è munito di due SAR indipendenti, posti sui due lati del satellite, per cui si ottengono immagini di due strisce del suolo contemporaneamente, sia a destra sia a sinistra rispetto alla direzione di volo del satellite, ma non necessariamente della stessa larghezza.

Lo schizzo della figura 8 mostra il principio di funzionamento di un SAR. Tutti gli elementi al suolo (edifici, vegetazione, oggetti ecc.) che si trovano nella striscia di scansione vengono "illuminati" dal SAR per un breve periodo e riflettono (parzialmente) gli impulsi in direzione del satellite. L'angolo di un SAR nella direzione di marcia è relativamente piccolo, si aggira sui 1° o 2°.

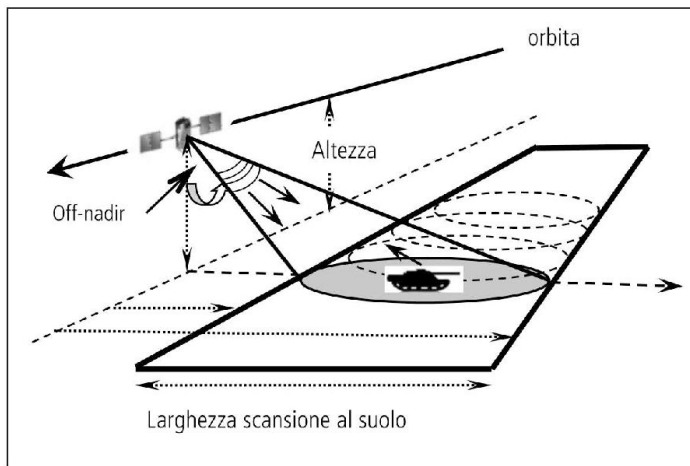


Figura 8a

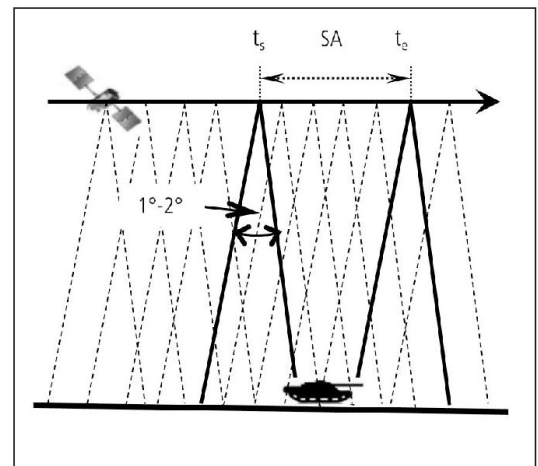


Figura 8b

Come mostra la figura 8b l'antenna SAR nel satellite riceve gli impulsi riflessi di un elemento al suolo, la prima volta all'istante t_s per terminare all'istante successivo t_e . L'intervallo tra questi due istanti ($t_e - t_s$) è chiamato "apertura sintetica", durante la quale gli elementi al suolo sono "colpiti" da numerosi impulsi radar. Dagli impulsi riflessi si possono estrarre elettronicamente due grandezze importanti: la distanza tra satellite e ogni elemento (e oggetto) al suolo e la velocità relativa tra satellite e questi elementi, chiamata anche velocità Doppler. Partendo da queste due informazioni è possibile ottenere, grazie a un raffinato procedimento d'elaborazione elettronica, immagini dettagliate del suolo e degli oggetti posti sulla striscia di terreno esaminata.

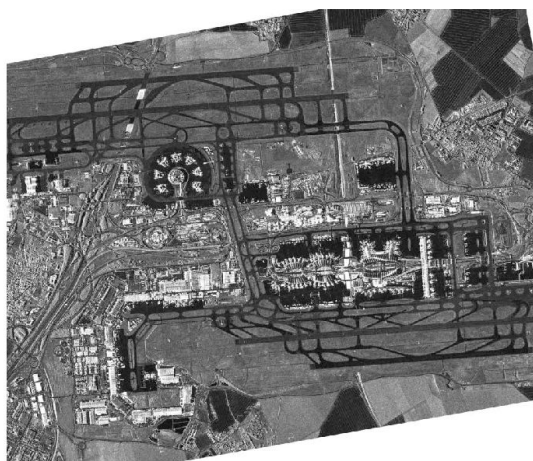


Figura 9

Figura 9 mostra l'immagine (parziale) dell'aeroporto civile Charles de Gaulle di Parigi ripresa il 7 giugno 2008 dal satellite di telerilevamento TerraSAR-X. L'angolo d'incidenza "off-nadir" era di 35° e l'altezza del satellite sopra l'aeroporto di 515 (km). L'immagine di questo sistema SAR ha una risoluzione spaziale al suolo di 2.4 (m). Il programma TerraSAR-X è stato sviluppato dall'Agenzia aerospaziale della Germania (DLR), supportata dal Ministero dell'Educazione e della Scienza (BMBF).

Il TerraSAR-X fa parte di una nuova generazione di SAR, capaci d'ottenere risoluzioni spaziali al suolo fino a un metro, mai ottenute in precedenza da satelliti simili. È stato messo in orbita il 15 giugno 2007 partendo dal cosmodromo di Baikonur nel Kazakistan.

Ottenere buone immagini con il sistema SAR in regioni montagnose come la Svizzera è un compito difficile poiché montagne e pendii ripidi causano zone d'ombra o distorsioni nelle immagini che non hanno nessuna corrispondenza con la realtà del terreno e che ben difficilmente si possono correggere a posteriori con i programmi d'elaborazione d'immagini.

L'unica soluzione possibile è un adattamento dell'angolo "off-nadir" al terreno accidentato in modo da minimizzare questi effetti negativi. L'esperienza ha dimostrato che, in una zona alpina come la nostra, l'angolo "off-nadir" ottimale (nel senso di una riduzione massima degli effetti negativi) si aggira tra i 35° e i 45°.

7. I programmi internazionali

Le prime immagini scattate da un satellite militare di ricognizione avvennero nel lontano 1960. Questo satellite-spia faceva parte di un programma spaziale statunitense denominato KH-1 (le due lettere significano Key Hole). Il programma conobbe all'inizio enormi difficoltà: basti pensare che su 10 tentativi di lancio solo uno andò in porto, il nono (KH-1/9). Questo satellite, munito di una telecamera analogica, fu lanciato il 18 agosto 1960 dal cosmodromo di Vandenberg, entrò in un'orbita quasi - polare e scattò circa 1'500 foto-

Equipaggiamento e armamento

grafie, specialmente del territorio russo. La prima immagine in assoluto mostra la base aerea di Mys Shmidta, dell'ex Unione Sovietica, situata sullo stretto di Bering. È una foto in bianco e nero, piuttosto sfuocata, con una risoluzione spaziale di 8 metri.

Nel primo decennio dell'era spaziale la ricognizione militare fu dominio incontrastato delle due superpotenze USA e USSR. Oggi essa è praticata regolarmente da 9 nazioni: USA, Russia, Cina, Francia, Germania, Italia, Giappone, Israele e India. Vi sono inoltre diverse altre nazioni che curano programmi spaziali civili di telerilevamento della terra, come ad esempio Canada, Gran Bretagna, Corea del Sud, Turchia, Malaysia, Nigeria, Argentina, Taiwan e Algeria.

Com'è stato ricordato in precedenza, la separazione tra programmi militari e civili non è sempre netta. Pure il finanziamento dei programmi non è facilmente identificabile, poiché l'onere finanziario può essere sopportato da tre fonti diverse: militari (Ministeri della Difesa), pubbliche (Ministeri per l'ambiente, Servizi meteo, Università ecc.) e private (industria). Lo schizzo della figura 10 mostra la situazione degli "sponsor" per i più importanti programmi spaziali di telerilevamento, sia civili che militari, in gran parte oggi operativi, in altri (pochi) casi in via di sviluppo avanzato. Si noti che un programma finanziato esclusivamente da privati non esiste. Tutti gli Stati hanno sempre voluto partecipare finanziariamente, con somme più o meno rilevanti, allo sviluppo e alle realizzazioni dei programmi.

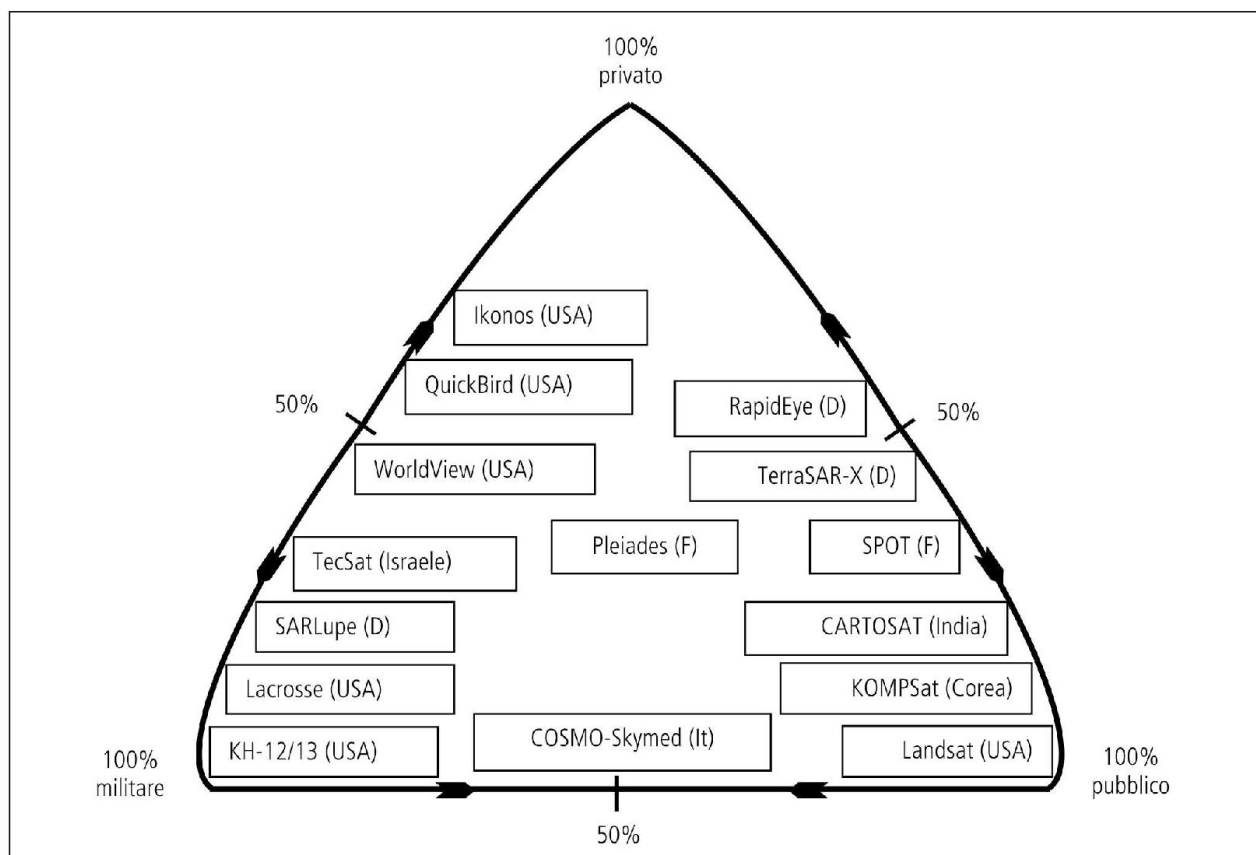


Figura 10

Il programma di satelliti francese "Pleiades", in via di sviluppo, è (per ora) l'unico programma che usufruisce di finanziamenti provenienti in egual misura dalle tre fonti.

Riferiamo di seguito brevemente sui programmi delle 6 nazioni più attive nel settore: USA, Russia, Cina, Francia, Germania e Italia. Non si dimentichi che molte informazioni riportate nell'articolo sono spesso supposizioni, stime o deduzioni effettuate da specialisti del ramo, plausibili senz'altro, ma mai confermate dai progettisti o dall'utenza. Il livello di segretezza di questi programmi rimane molto alto. Persino le fotografie dei satelliti sono classificate e solo raramente si possono trovare in Internet.

Ci limitiamo ai programmi attuali, tralasciando le dozzine di programmi del passato, che hanno fatto la storia della ricognizione spaziale e hanno dato impulsi fondamentali allo sviluppo tecnologico in questo settore.

USA

Gli Stati Uniti hanno sviluppato negli ultimi anni tre programmi militari per la ricognizione, ognuno di essi è costituito da più satelliti: questi vengono potenziati regolarmente e nuovi satelliti sostituiscono quelli obsoleti in orbita o in disfunzione. I satelliti dei primi due programmi sono dotati di sensori ottici, il terzo di un SAR. I satelliti ottici portano il nome di *KH-12* e *Misty*, quello con il SAR di *Lacrosse*.

La messa in orbita dei satelliti *KH-12* iniziò nell'anno 2000: ne seguirono altri 5, l'ultimo del quale fu portato nello spazio da un vettore Titan IV, partito dal cosmodromo di Vandenberg, a fine 2005. I *KH-12* rappresentano la dodicesima serie di satelliti militari, messi in orbita dagli USA a partire dal 1960. Si suppone che dei 5 satelliti della serie *KH-12* soltanto gli ultimi due siano ancora operativi: i primi tre hanno terminato di funzionare o sono rientrati nell'atmosfera autodistruggendosi. Si tratta di satelliti molto pesanti (18 – 20 tonnellate), che ruotano attorno alla terra in un'orbita quasi – polare, sincrona con il sole, dalla durata di 100 minuti e con un'inclinazione di 98° rispetto all'equatore. L'orbita (bassa) è assai ellittica, l'apogeo dovrebbe aggirarsi sui 1'000 (km), il perigeo sui 300 (km). Si sa ben poco dei suoi sensori. È certo che i satelliti sono muniti di sensori ottici che operano quindi nella banda di frequenze visive e IR "vicino". La risoluzione spaziale al suolo dovrebbe essere molto buona e raggiungere i 20 – 30 (cm). Alcuni autori hanno ipotizzato che i satelliti di questa serie *KH-12* siano dotati pure di sensori all'infrarosso "lontano" per assicurarsi una certa capacità di ricognizione notturna, ma l'ipotesi non è mai stata confermata.

Nel 1990, con una missione dello Space Shuttle, fu portato nello spazio un nuovo tipo di satellite di ricognizione, dalla forma cilindrica ricoperta interamente da pannelli solari. Fu chiamato *Misty-1* (nebbioso). Esso era dotato sicuramente di sensori ottici. Fu immesso in un'orbita molto bassa (attorno ai 200 km) e un'inclinazione di 62°. Oggi non è più operativo.

Nel 1999 un razzo Titan IV partì dalla base di Vandenberg e portò nello spazio un secondo esemplare, il *Misty-2*, simile al primo: si ritiene che questo satellite sia tuttora operativo. La forma cilindrica, assai inusuale, ha suggerito che i due *Misty* siano stati progettati come satelliti "stealth", cioè difficilmente reperibili sia da sistemi ottici sia dai radar. In effetti ancora oggi l'orbita su cui ruota *Misty-2* rimane un mistero.



Figura 11

I due satelliti *KH-12* e *Misty* sono stati, senza ombra di dubbio, i protagonisti di ricognizioni mirate per identificare possibili bersagli durante i conflitti iracheno e afgano. Ancora oggi giocano un ruolo importante negli scenari di guerre mediorientali. La figura 11 mostra, a titolo puramente informativo, il risultato di una ricognizione sopra l'Afghanistan eseguita (sembra) dal satellite *Misty-2*. Si tratta del campo d'addestramento militare di Zhawar Kili Al-Badr nell'est del paese.

Se informazioni sul programma *Misty* sono poco conosciute, quelle sul programma *Lacrosse* lo sono ancor meno. Questo programma fu lanciato agli inizi degli anni 1980, più che altro per un senso d'impotenza e frustrazione da parte statunitense. Allora, nel mezzo della guerra fredda, gli Stati Uniti avevano la necessità di spiare le attività delle installazioni militari nell'ex Unione Sovietica, ma spesso queste si trovavano sotto uno

strato nuvoloso, impenetrabile per tutti i sensori ottici o infrarosso.

Ad esempio i cieli sopra le installazioni militari di Krasnojarsk e di Novaja Semlja erano nel 70% del tempo nascoste sotto una spessa coltre di nuvole. Lo stesso valeva per la regione di Talin, dove si sospettava l'installazione di una base missilistica ABM.

Con i satelliti-spia allora a disposizione il controllo dallo spazio e la verifica di certe attività militari nell'ex-URSS duravano anni, un periodo indiscutibilmente troppo lungo e inaccettabile. Fu allora deciso di promuovere con urgenza lo sviluppo dei sensori SAR che avrebbero risolto il problema.

Nacque così il programma *Lacrosse*. Il primo satellite fu portato nello spazio dallo Space Shuttle il 2 dicembre 1988. Ne seguirono altri quattro, l'ultimo del quale ha raggiunto lo spazio il 30 aprile 2005 con un vettore Titan 403 lanciato dal cosmodromo Kennedy Space Center.

Tutti e cinque i satelliti *Lacrosse* ruotano su orbite quasi circolari con altezze tra 650 (km) e 700 (km) e con inclinazioni tra i 57° e i 68°. Essi compiono mappature tramite il SAR, eseguendo scansioni del suolo sottostante da ambedue i lati del satellite con angoli "off-nadir" tra 20° e 50°, ciò che corrisponde a una larghezza della "striscia" di terreno attorno ai 500 (km).

Tutti i *Lacrosse* sorvolano regioni dell'Europa, vicino Oriente e Asia centrale. Si suppone che soltanto i due ultimi satelliti della serie, *Lacrosse-4* / *-5* siano ancora operativi: alcuni osservatori ritengono che anche il *Lacrosse-3* sia tuttora operativo.

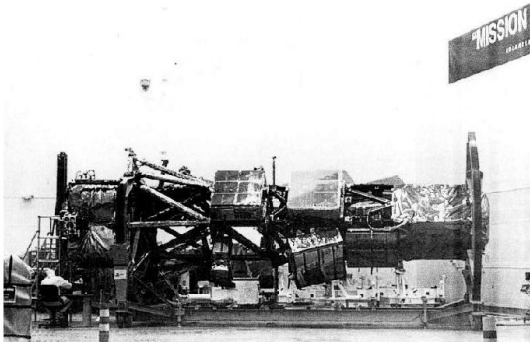


Figura 12

Si è pure calcolato che, ammettendo unicamente operativi i due satelliti *Lacrosse-4* e *-5*, l'intervallo medio tra due sorvoli della stessa regione dell'Europa centrale (quindi della Russia) avviene attualmente ogni 5 – 7 ore nei casi più favorevoli, e ogni 15 – 20 ore nei casi più sfavorevoli. Si tratta di periodi abbastanza lunghi, ma notevolmente più corti se paragonati con le attese di anni in cui erano costretti gli Stati Uniti con i programmi antecedenti al *Lacrosse*.

La figura 12 mostra un satellite *Lacrosse* durante l'assemblaggio nei stabilimenti della Lockheed Martin Astronautics in Colorado. Si tratta dell'unica fotografia di un satellite *Lacrosse* di pubblico dominio.

Russia

I programmi russi con satelliti militari di ricognizione erano abbastanza ben conosciuti durante gli anni della guerra fredda, e un po' oltre, fino alla fine del secolo ventesimo. Dal 2000 in poi le informazioni si sono fatte più rare e soprattutto più incerte. Di sicuro si sa che i programmi russi degli ultimi dieci anni si ricollegano con quelli precedenti: i satelliti sono simili ma l'apparecchiatura è senz'altro più moderna. Inoltre è assodato che i russi combinano spesso e volentieri programmi civili con quelli militari. Ad esempio nel 2003 è stato messo in orbita un satellite civile per il telerilevamento chiamato *Orion-E* (*Orion 2003-055A*) che ha pure una missione militare di ricognizione. Esso ruota attorno alla terra su un'orbita bassa a un'altezza di 470 (km) e con 67° d'inclinazione. I programmi "moderni", che si ricollegano a quelli più "vecchi", sono tre, denominati "*Orlets-1/Don*", "*Kobalt-M*" e "*Persona*". Ogni programma è costituito da diversi satelliti, messi in orbita da un unico vettore, i ben noti *Cosmos*, con lanci avvenuti tra l'anno 2000 e il 2006.

Il programma *Orlets-1/Don* iniziò nel 1989: si sono contati in totale 8 missioni, l'ultimo lancio è avvenuto nel 2007. Gli ultimi due satelliti pesavano 6'750 (kg) ed erano dotati di sensori ottici analogici. Essi fotografavano e filmavano aeree d'interesse durante 2 o 3 mesi, al termine del quale il materiale fotografico, racchiuso in una capsula, rientrava a terra e veniva recuperato per lo sviluppo e le analisi di laboratorio. È stato accertato che almeno in un caso la capsula con il materiale fotografico andò distrutta durante la fase di rientro. È quindi possibile che a causa di questo incidente l'intero programma sia stato annullato.

Il programma *Kobalt-M* è stato per lunghi anni paragonato a quello statunitense *KH-11*; ma più tardi ci si rese conto che la tecnologia usata nei *KH-11* doveva essere superiore a quella russa. I *Kobalt-M* rappresentano la continuazione di un programma iniziato nel 1983 (programma *Oktant*). Il primo esemplare fu messo in orbita nel 2004, l'ultimo (il quinto) il 29 aprile 2009. Sommando i satelliti della serie precedente, si arriva a un totale di 85 satelliti di ricognizione *Kobalt-M*, operativi durante 30 anni. Non va però dimenticato che la durata media di una singola missione con questo tipo di satellite è relativamente breve: circa 90 giorni.

Persona rappresenta il più moderno programma di satelliti di ricognizione militari prodotto dalla Russia negli ultimi anni. A nostra conoscenza è stato fabbricato finora un solo satellite. È partito dal cosmodromo di Plesetsk il 26 giugno 2008 a bordo di un vettore *Soyuz-2*. Esso pesa 6'500 (kg), ha una lunghezza di 7 (m) e un diametro di 2.4 (m). È dotato di un sensore ottico con camera digitale CCD. Ha un grosso telescopio del tipo *Korsch* a 3 specchi, il più grande dei quali misura 1.5 (m) di diametro e una lunghezza focale di 20 (m). Da questi dati si è dedotto che la risoluzione spaziale al suolo è dell'ordine di 30 centimetri.



Figura 13

Persona ruotava attorno alla terra su un'orbita fortemente ellittica, sincrona con il sole, e con 98° d'inclinazione rispetto all'equatore. Cinque giorni dopo il lancio, i russi portarono il satellite su un'altra orbita, questa volta quasi - circolare, a un'altezza di 740 (km) dalla terra. La ragione per questo cambiamento d'orbita non è mai stata chiarita.

La figura 13 mostra il satellite *Persona* in un'immagine artistica, pubblicata negli Stati Uniti, ma molto vicina alla realtà.

Il destino di questo satellite-spia è avvolto in un mistero. Non si sa se sia ancora operativo o meno, poiché alcuni osservatori assicurano (ma non è mai stato confermato) che nel febbraio del 2009 i sistemi elettronici subirono un guasto, dalle conseguenze serie ma sconosciute sulle funzionalità del satellite.

Cina

Anche la Repubblica cinese cura un programma di satelliti militari per la ricognizione, denominato *Yaogan Weixing* (che significa Remote Sensing Satellite) o semplicemente *Yaogan*. I satelliti sono stati sviluppati e costruiti dall'Accademia per la tecnologia spaziale di Shanghai in collaborazione con l'industria aerospaziale cinese, pure statale. Le autorità hanno dichiarato che gli *Yaogan* sono satelliti civili: ufficialmente perseguono finalità come "scientific experiments, land survey, crop yield assessment and disaster monitoring". In realtà sono ritenuti dal mondo occidentale dei satelliti-spia militari. In totale sono stati messi in orbita 20 *Yaogan* in 16 lanci. In due occasioni con lo stesso vettore furono lanciati tre satelliti. Il primo lancio avvenne nell'aprile 2006 (fu considerato un satellite di prova), l'ultimo nel novembre 2012. La maggior parte dei satelliti ruota attorno alla terra ad altezze variabili tra i 500 e i 650 (km), in orbite quasi - polari con angoli d'inclinazione sui 98°. In due casi però furono misurate orbite più elevate, attorno ai 1'100 (km) con inclinazioni di 63°. Su queste orbite ruotano sei satelliti, tutti equipaggiati per lo spionaggio e l'intelligence elettronica (ELINT).

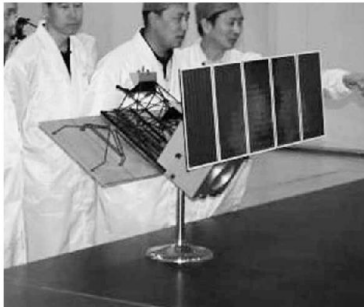


Figura 14

Cinque *Yaogan* sono dotati di SAR, nei restanti nove casi i sensori sono di tipo ottico o infrarosso. Ogni *Yaogan* ha un peso attorno alle 2.7 tonnellate. Furono tutti lanciati nello spazio da vettori denominati "Lunga marcia", partiti dai due più importanti cosmodromi cinesi, da Jiuquan (6 lanci) e da Taiyuan (10 lanci).

Scarsissimi i dati e le informazioni sulle prestazioni di questi satelliti.

Non esistono nemmeno immagini del satellite, ad eccezione di una singola foto, che mostriamo nella figura 14. Si tratta di un modellino dello *Yaogan* - 1 con radar SAR, esposto dal cinese in occasione di una mostra aerospaziale.

Francia

Nel 1978 la Francia propose d'istituire un'organizzazione internazionale per il monitoraggio della terra dallo spazio sotto l'egida delle Nazioni Unite. Non se ne fece nulla per l'opposizione degli Stati Uniti e dell'allora URSS. Iniziò così la "via solitaria" della Francia nel campo spaziale, resisi concreto con lo sviluppo del programma SPOT, una serie di satelliti per il telerilevamento della terra e degli oceani a scopi civili, che permise alla Francia d'acquisire grande esperienza nel settore spaziale. Un vero programma per satelliti militari di ricognizione iniziò più tardi, e non seguendo una via solitaria, ma cercando una partecipazione europea: fu trovata con l'Italia e con la Spagna. Nacque così il programma *Helios-1*. L'Italia promise di partecipare ai costi con il 14%, la Spagna con il 7%: i rimanenti 79% erano sopportati dalla Francia.

Furono costruiti due satelliti, messi in orbita il primo nel 1995 (*Helios-1A*) e il secondo nel 1999 (*Helios-1B*). In ambedue i casi si utilizzò per i lanci il vettore Ariane-4 che avvennero dal cosmodromo di Kourou nella Guyana francese. A questo primo programma fece seguito un secondo, *Helios-2*, che prevedeva lo sviluppo e la costruzione di due altri satelliti, simili ai precedenti ma potenziati e con tecnologie senz'altro più avanzate.

La ricerca di una collaborazione europea si fece però più difficile, poiché Italia e Germania avevano deciso di sviluppare un proprio programma e rifiutarono l'offerta di partecipazione francese. Per contro Belgio e Grecia mostrarono interesse a *Helios-2*, ma le loro quote partecipative risultarono alquanto modeste: il 2.5% per ognuno dei due paesi. La Francia da sola si dovette assumere il 95% degli oneri finanziari. *Helios-2A* fu lanciato il 18 dicembre 2004, e *Helios-2B* allo stesso giorno ma cinque anni più tardi (2009). Ambedue utilizzarono il nuovo vettore francese Ariane-5 per la messa in orbita.

Tutti questi satelliti della serie *Helios* sono dotati di sensori ottici d'alta prestazione con camere digitali CCD: la loro risoluzione spaziale si aggira sui 30 (cm) al suolo. Essi ruotano attorno alla terra a un'altezza di 680 (km), l'orbita è quasi - circolare e sincrona con il sole. È assodato che *Helios-1A* fornì all'aviazione NATO informazioni preziose durante il conflitto del Kosovo. Si stima che sono state scattate da *Helios-1A* oltre 100'000 immagini delle regioni balcaniche durante le operazioni militari.

I primi due satelliti della serie *Helios-1* sono oggi con ogni probabilità fuori uso.

È interessante notare che, mentre i primi due satelliti della serie *Helios-1* pesavano 2.5 (to), i due successivi *Helios-2* pesano 4.2 (to). Non si conoscono esattamente le ragioni per questo aumento di peso ma si suppone che i due satelliti *Helios-2* siano dotati, oltre ai sensori ottici, anche di una camera termale nella banda di frequenza "media", tra 1.30 (µm) e 3.00 (µm) per assicurare una certa capacità di ricognizione notturna. Ma nuovamente su questa supposizione non vi sono certezze.

Germania

Mentre la Francia si è focalizzata nello sviluppo di sensori ottici, la Germania si è concentrata su quelli SAR. Il programma tedesco di satelliti per la ricognizione si chiama *SAR Lupe* (*Lupe* = lente d'ingrandimento). La separazione dei programmi e la loro complementarità tra Francia (*Helios-2*) e Germania (*SAR Lupe*) era stata concordata e sottoscritta con un accordo a livello ministeriale nel 2002. Si è voluto creare così una costellazione di satelliti militari per la ricognizione tutta europea e indipendente da quella degli Stati Uniti.

Sono stati costruiti e messi in orbita dal cosmodromo di Plesetsk in Russia (vettore *Cosmos 3M*) finora cinque *SAR Lupe*, tutti identici tra loro. Ruotano su 3 orbite differenti quasi – circolari passando sopra le calotte polari a un'altezza di circa 500 (km) e un'inclinazione di 98° rispetto all'equatore. Il primo lancio avvenne nel dicembre 2006, l'ultimo in luglio 2008. Ad eccezione del primo *SAR Lupe* tutti gli altri satelliti sono oggi operativi.



Figura 15a

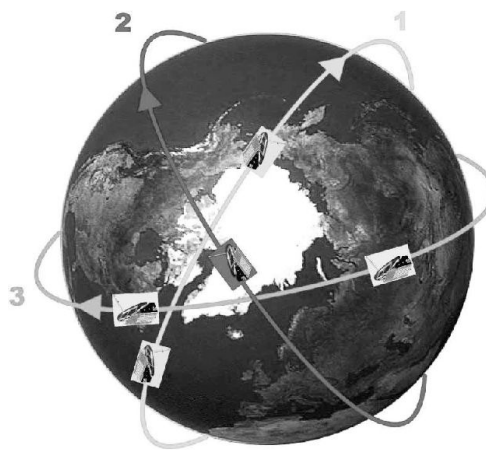


Figura 15b

La figura 15a mostra un'immagine artistica del satellite in orbita, ben visibile è l'antenna SAR rivolta verso la terra. Nella figura 15b sono rappresentate le tre orbite che s'incrociano sopra la calotta polare. Come indicato dalla figura sull'orbita 1 ruotano due *SAR Lupe*, sull'orbita 2 uno solo e sull'orbita 3 i rimanenti due satelliti.

Un *SAR Lupe* ha dimensioni di 3.6 x 2.7 x 1.6 (m) e pesa 720 (kg). Questi satelliti hanno la possibilità d'operare in due diverse modalità. Con la prima si copre una striscia di terreno di 8 (km) di larghezza e 60 (km) di lunghezza, nella quale si ottengono immagini con una risoluzione spaziale di 1.5 metri. Con la seconda la striscia terreno è molto più piccola (5.5 x 5.5 km²) ma la risoluzione è inferiore a 1 metro: in altre parole si ottengono immagini di piccole superfici ma con un'alta risoluzione.

La costruzione dei *SAR Lupe* è stata affidata alla ditta OHB System AG di Brema. Il costo totale per la fabbricazione dei cinque satelliti è quantificato in CHF 420 milioni. L'ammontare comprende pure la realizzazione e la gestione del "segmento terrestre", cioè della stazione di controllo, ricezione e valutazione delle immagini. Questo centro si trova a Gelsdorf, una ventina di chilometri a sud di Bonn. I *SAR Lupe* sono gestiti dalla Bundeswehr, che ha creato un reparto speciale "ricognizione dallo spazio", integrato nel "segmento terrestre": vi prestano servizio 90 persone.

Da un paio d'anni si discute in Germania del programma successivo, di cui esiste già la denominazione *SAR Lupe / 2° generazione*, da sviluppare e realizzare possibilmente in collaborazione con la Francia, ma finora, a nostra conoscenza, non si è ancora giunti a un accordo concreto.

Italia

Francia e Italia hanno siglato a Torino, nel 2001, un accordo intergovernativo di massima, ratificato poi il 10 gennaio 2004, per sviluppare un programma spaziale comune finalizzato all'osservazione e al telerilevamento terrestre, anche a scopi militari. Un accordo un po' simile a quello stipulato tra Francia e Germania e che ha portato allo sviluppo del tedesco *SAR Lupe*. La Francia si è proposta di sviluppare e mettere in orbita due satelliti con sensori ottici (programma conosciuto con il nome di *Pleiades*), mentre la controparte

italiana ha assicurato di sviluppare un programma chiamandolo *COSMO-SkyMed*, abbreviazione di "COntallation of small Satellites for Mediterranean basin Observation". Questo programma comprende 4 satelliti dotati ognuno di un SAR, tutt'oggi operativi. Il primo satellite fu messo in orbita a metà 2007, l'ultimo a inizio novembre 2010. Tutti i lanci sono avvenuti dal cosmodromo statunitense di Vandenberg utilizzando un vettore Delta. Come rilevato in [5] *COSMO-SkyMed* è un programma del tipo "duale" nel senso che i dati ricevuti dai satelliti e le applicazioni previste sono utilizzabili sia in ambito civile sia in quello militare. Il suo finanziamento è avvenuto coinvolgendo tre enti governativi italiani: l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), il Ministero della Difesa e il Ministero dell'Istruzione e della ricerca scientifica. La responsabilità delle infrastrutture e della gestione in orbita dei satelliti è stata affidata a Telespazio. *COSMO-SkyMed* si è rivelato qualitativamente un ottimo programma spaziale, ma molto costoso: si sono spesi circa € 1 miliardo, quindi da due a tre volte di più del tedesco *SAR Lupe*.

I quattro satelliti ruotano a un'altezza di 620 (km), su due orbite identiche quasi – circolare, sincrone con il sole, hanno un'inclinazione di 97.9° ma sono sfasate di 90° una dall'altra. Ogni satellite compie quasi 15 rivoluzioni al giorno attorno alla terra e in media ogni 16 giorni sorvola lo stesso punto. La costellazione dei quattro satelliti permette d'ottenere immagini di una certa zona d'interesse mediamente ogni 12 ore. Il SAR opera nella banda di frequenza X e più precisamente alla frequenza di 9.6 (GHz), gli angoli "off-nadir" dell'antenna sono di 20° e 60°.

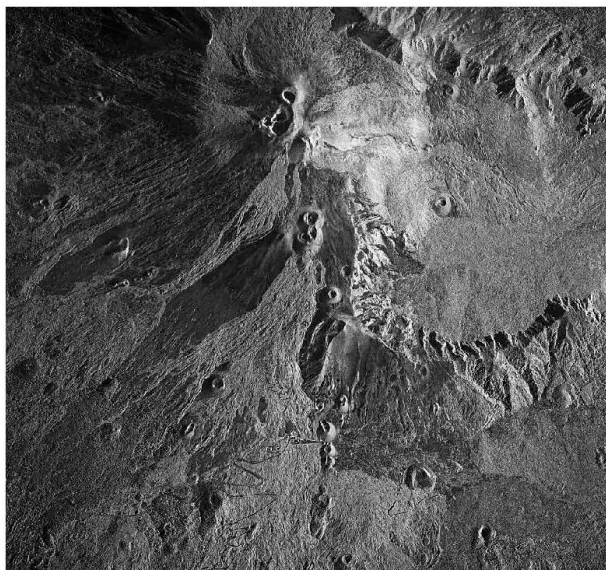


Figura 16

L'operatore ha la possibilità di scelta tra sei diverse modalità di scansione del suolo. Si va dalla scansione di grandi superfici con una risoluzione mediocre (attorno ai 30 metri) a quelle molto più piccole ma con ottime risoluzioni spaziali (attorno ai 50 cm). Quest'ultima modalità, con un'ottima risoluzione, è tuttavia riservata ai soli militari.

La figura 16 mostra la zona culminante dell'Etna nella parte superiore della fotografia con diversi crateri sommitali, scattate da un satellite *COSMO-SkyMed*. Si noti, nella parte inferiore della fotografia, la strada tortuosa che sale sulle pendici del vulcano fino a raggiungere il rifugio "Sapienza".

È stato recentemente firmato fra l'Agenzia Spaziale Italiana e Thales Alenia Space Italia un contratto per il programma *COSMO-SkyMed*, 2° generazione. La messa in opera di questa seconda generazione è prevista per la fine del 2016. Essa comprende il lancio di due nuovi satelliti (il primo lancio è previsto entro metà del 2016) e l'adeguamento dei segmenti di terra e della logistica.

8... e la Svizzera?

I satelliti militari di ricognizione hanno raggiunto risultati ragguardevoli, sia dal punto di vista qualitativo delle informazioni come da quello quantitativo (frequenza dei sorvoli), ma i margini di miglioramenti dei diversi elementi sono ancora molto grandi. Vari sono i "cantieri" tuttora aperti: si vuole migliorare la risoluzione dei sensori (raggiungere una risoluzione spaziale di 20 cm, se possibile minore), potenziare il management e la trasmissione delle immagini al suolo, aumentare il numero dei sorvoli giornali (con un numero maggiore di satelliti più piccoli e leggeri), rendere i satelliti "stealth" (cioè "quasi" invisibili e quindi diminuire la loro vulnerabilità), accrescere la sicurezza dei dati trasmessi (migliorando la crittografia). Sono campi in cui si sta lavorando alacremente in molti paesi tecnologicamente e industrialmente sviluppati: tutte attività che produrranno, a breve e medio termine, sistemi sempre più performanti.

A questo punto sorge spontanea una domanda: cosa può fare un piccolo Stato come la Svizzera?

Anzitutto prendere coscienza delle grandi possibilità offerte dalla "Space Operations" (Space Ops) e in particolare dalla "Space Situational Awareness" (SSA). Con questo termine anglosassone, che tradotto suona come "consapevolezza della situazione nello spazio", s'intende il monitoraggio dell'ambiente spaziale e degli oggetti orbitanti allo scopo di individuare potenziali minacce, casuali o naturali o che provengano da attori ostili.

Bisogna rendersi conto che già oggi la Svizzera è sorvolata costantemente da almeno una trentina di satelliti–spia, in grado d'ottenere immagini d'alta qualità in ogni angolo del nostro paese. Ma vi è di più. La SSA favorisce un miglior controllo dello spazio per monitorare sia gli asteroidi pericolosi sia i detriti spaziali: questi ultimi rappresentano una minaccia crescente non solo per i futuri astronauti

ma anche per la popolazione civile. L'Agenzia spaziale europea ESA ha già in cantiere un programma SSA. Lanciato ufficialmente con un mandato ministeriale il 1 gennaio 2009 questo programma, dopo una prima fase triennale, è entrato nel 2011 nella fase implementativa che si estende dal 2011 fino al 2019. Lo scopo del programma SSA dell'Agenzia ESA è " ... to support Europe's independent utilisation of, and access to, space through the provision of timely and accurate information and data regarding the space environment, and particularly regarding hazards to infrastructure in orbit and on the ground.": per maggiori dettagli vedi il sito ufficiale ESA [6].

Come fatto notare dall'Osservatorio di politica internazionale italiano (vedi [4]) la SSA è quindi un requisito essenziale per il mantenimento della sicurezza degli assets spaziali di un paese, a prescindere dalla natura della minaccia, ed ha quindi un preciso valore strategico e di difesa.

Realizzare una costellazione di satelliti militari per la ricognizione è molto costoso. Non si tratta soltanto di sviluppare e fabbricare il segmento spaziale (satelliti) ma anche di realizzare e gestire il segmento terrestre (centro di controllo, valutazione e analisi dei dati), d'acquisire il vettore e coprire i costi di lancio da cosmodromi all'estero. L'impegno finanziario per le diverse attività è grande e fuori dalla portata di un piccolo Stato come la Svizzera. Tuttavia la minaccia sempre più globale, congiunta all'impossibilità d'usufruire dei servizi che un'alleanza militare mette normalmente a disposizione dei suoi membri (leggi nostra neutralità), fa accrescere anche da noi la consapevolezza d'ottenere, in caso di necessità, dati "originali" dallo spazio, cioè non selezionati e non modificati da terzi. Soddisfare questa esigenza militare è possibile soltanto cooperando con paesi che già possiedono un assets di questo tipo e un'esperienza spaziale. L'aspetto "militare" in quest'ambito è rilevante. Far affidamento su qualche immagine ottenuta da qualche satellite civile sarebbe, in caso di crisi o di conflitto, oltremodo rischioso.

Da quanto esposto si deducono le seguenti tre personalissime tesi (o suggerimenti) formulate dell'autore.

1° tesi È auspicabile che la Svizzera crei a breve termine una propria struttura organizzativa per realizzare un programma "Space Situational Awareness" nazionale.

2° tesi È auspicabile che la Svizzera crei le basi per una cooperazione internazionale, con quei paesi che già possiedono un assets ed esperienze spaziali, al fine d'ottenere, in caso di necessità, accesso a dati originali da satelliti militari di ricognizione. Ovviamente sono da chiarire, in questo contesto e in via preliminare, tutti gli aspetti salienti della cooperazione, in particolare quelli militari, politici, finanziari, giuridici, tecnici e delle risorse umane.

3° tesi Sarebbe auspicabile che la Svizzera crei un centro di competenza nazionale per le applicazioni militari nello spazio.

È importante che il nostro paese nel settore spaziale ... non perda il treno. ■

Fonti

[1] Trattato sullo spazio extra-atmosferico ("Outer Space Treaty"), vedi ad esempio la traduzione in italiano in: http://www.difesa.it/SMD/_CASD/IM/ISSMI/Corsi/Corso_Consigliere_Giuridico/Documents/50874_Londra_Mosca_Washington1967.pdf

[2] ESA Eduspace, www.esa.int/specials, QuickBird

[3] Università degli studi di Modena e Reggio Emilia, "Tecnologia di monitoraggio ambientale / Radar", 2010, Teggi Sergio, <http://cdm.unimo.it/home/dimec/teggi.serpio/RS-2010-Radar%20e%20SAR.pdf>

[4] Osservatorio di politica internazionale, "La sicurezza nello spazio: risvolti italiani e internazionali", Nr. 29, luglio 2011, Valerio Briani. http://www.iai.it/pdf/Oss_Polinternazionale/pi_n_0029.pdf

[5] ASI, Agenzia Spaziale Italiana, "COSMO-SkyMed, sistema duale per l'osservazione della terra", http://www.asi.it/it/attivita/osservazione_terra/cosmoskymed

[6] European Space Agency (ESA), Space Situational Awareness, "About SSA", http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Space_Situational_Awareness/About_SSA