

# Dall'iperdeterminazione di un Satellite a quella del centro di gravità della Terra

di Fabrizio Bernardini

*Cogliamo l'esempio dello sfortunato satellite Cryosat (la cui missione è descritta altrove in questo stesso numero della rivista) per cercare di spiegare come sia possibile misurare con elevata precisione la posizione di un satellite orbitante la Terra. Queste precisioni sono richieste non solo da certi satelliti per telerilevamento (come Cryosat) ma anche dai satelliti per geodesia e da satelliti per particolari applicazioni scientifiche. Infatti le stesse tecniche permettono di definire dimensioni, forma e moti del pianeta in virtù di processi matematici ed analitici altamente raffinati.*

## Introduzione

Determinare un'orbita vuol dire ricavare, con alcune osservazioni, gli elementi geometrici dell'orbita di un satellite al fine di poterne conoscere, grazie alle leggi di Keplero (ed a diversi raffinamenti successivi) la posizione in funzione del tempo.

Le basi matematiche del problema furono risolte nel corso del 18° secolo, ma solo con l'avvento della guerra fredda il problema assunse un significato gravemente pratico: quello di determinare la traiettoria di un missile balistico intercontinentale da osservazioni radar.

Con il cambiare dei tempi, il rilevamento e la misura del moto di un satellite hanno acquisito un peso sempre più rilevante in molte esperienze scientifiche e di telerilevamento. Quando i sensori di bordo (ad esempio il radar-altimetro SIRAL di Cryosat) hanno precisioni misurabili in centimetri, è necessario rivedere completamente il problema della determinazione dell'orbita. I

sensori radar (calibrati con mezzi ottici) che operano in modo passivo lasciano il posto a sistemi radio di tipo attivo e addirittura a sistemi laser per poter raggiungere le precisioni richieste.

Anche Cryosat reca a bordo, ad esempio, un gruppo di riflettori Laser (molto simili ai riflettori usati nelle moderne stazioni di rilievo topografico) che adeguate stazioni a terra possono usare per determinare distanza e velocità relativa del satellite dalla stazione: con più osservazioni l'orbita è perfettamente nota. Vengono ovviamente usati più riflettori raggruppati per poter coprire, come campo di osservazione, almeno un emisfero di visibilità. Purtroppo le stazioni di terra sono relativamente complesse ed il loro numero è limitato, così come le opportunità operative possono essere limitate dalle condizioni meteorologiche. In breve i sistemi Laser, seppure validissimi, vengono usati principalmente per scopi di calibrazione.

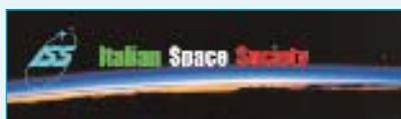
Il termine "iperdeterminare" è caro ai topografi e, pur non essendo l'autore uno specialista di rilievo, ne fa volentieri uso perché descrive sinteticamente il risultato che si cerca di raggiungere. Stabilire con elevata precisione la posizione nello spazio di un oggetto orbitante la Terra a centinaia di km di distanza ed a velocità di quasi 30000 km/ora non è facile ma è oggi considerato ormai un processo di 'routine'; ma questa disciplina, correttamente nota come orbitografia, si collega ai sistemi geodetici in modo duale e permette di misurare la Terra con precisioni inferiori al centimetro.



Antenna del sistema DORIS a bordo del satellite CryoSat  
Credits: ESA - K. Büchler

## DORIS

Cryosat è anche dotato del sistema DORIS, ideato dal CNES (Centro Nazionale Studi Spaziali, in Francia) ed operativo, dal 1990, su diversi satelliti geodetici e di telerilevamento. DORIS è anche una rete terrestre di 60 stazioni, ognuna precisamente riferita in termini geodetici, che trasmette segnali a frequenza ultra-stabile su due diverse bande, in UHF (circa 400 MHz) ed in Banda S (circa 2000 MHz). La trasmissione di una stazione viene ricevuta dal ricevitore DORIS a bordo del satellite dotato di un oscillatore di riferimento ad elevata stabilità. Il ricevitore può allora misurare con precisione, in base allo



**La breve serie sui sistemi di Guida, Navigazione e Controllo, ritornerà a partire dal prossimo numero.**

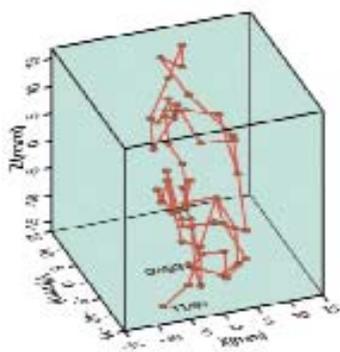


Figura 1 - Moto del centro della Terra all'interno di un cubo di 3 centimetri di lato

spostamento in frequenza dovuto all'effetto Doppler (e nelle versioni più recenti anche grazie a misure di fase), la velocità del satellite rispetto alla stazione. I dati rilevati a bordo vengono poi trasmessi a terra usando i normali canali telemetrici del satellite.

Ovviamente le misure effettuate devono essere anche correttamente riferite al Tempo Universale o meglio al Tempo Atomico Internazionale. Per questo motivo alcune delle stazioni di terra del sistema DORIS inviano al ricevitore di bordo dati e parametri per calibrare il riferimento temporale oltre a informazioni geodetiche che contribuiscono a incrementare la precisione delle misure.

Le diverse misure di velocità rispetto ad una singola stazione, ripetute poi per ogni altra stazione che il volo del satellite incontra, permette infine di ricostruire a terra l'orbita del satellite in maniera estremamente precisa. Dati orbitali così ottenuti sono detti "ricostruiti" e vengono poi distribuiti

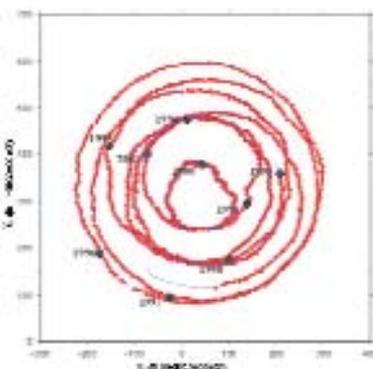


Figura 2 - Moto dell'asse di rotazione terrestre, nel corso degli ultimi 10 anni, intorno alla posizione nominale

alla comunità scientifica per poterli correlare con i risultati dei diversi esperimenti.

In un certo senso il sistema DORIS ricorda un poco il GPS. Invece di una costellazione di satelliti di posizionamento si ha una sorta di "costellazione" di stazioni di terra che il veicolo usa per determinare informazioni di velocità dalle quali si può estrapolare la posizione. Un'altra analogia con il GPS è sia l'uso contemporaneo di due diverse bande operative, essenziale per la compensazione delle distorsioni variabili dovute alla ionosfera, che l'invio di informazioni temporali di riferimento.

### L'altra faccia di DORIS

I ricevitori DORIS attualmente a bordo di 7 satelliti producono una notevole mole di dati, anche perché le 60 stazioni di terra relative al sistema di misura possono essere automatizzate. La grande quantità di dati permette allora di estendere l'applicazione delle misure al problema inverso: dalla posizione del satellite ricavare informazioni sul geoide terrestre, sul campo gravitazionale e su altre quantità utili alla "metrologia" del pianeta.

Poiché il moto del satellite è soggetto a leggi fondamentali, le variazioni riscontrate nell'orbita di un satellite possono essere ricondotte, mediante modelli matematici a fenomeni perturbativi di diverso tipo a loro volta riconducibili alle quantità geodetiche di interesse.

In pratica, sebbene il sistema DORIS sia ottimizzato per l'orbitografia di satelliti, esso offre importantissime ricadute in geodesia tra cui:

- misura del campo gravitazionale terrestre e delle sue variazioni
- misura delle variazioni nell'asse di rotazione terrestre
- contributo alla rete geodetica mondiale ITRF (International Terrestrial Reference Frame)
- monitoraggio dello spostamento delle masse continentali, o anche di ghiacciai

- misura del livello di oceani, mari e laghi.

I risultati regolarmente prodotti in questi settori sono semplicemente eccezionali. Vogliamo semplicemente accennare, per esempio, alla misura della posizione del centro di gravità terrestre che, continuamente monitorato, ha permesso di stabilire che esso varia all'interno di un cubo di 3 centimetri di lato (vedi Figura 1).

Un altro esempio è la variazione dell'asse di rotazione terrestre, che continue misure mostrano "ruotare" in un quadrato di circa 600 milliarcosecondi che equivalgono a poco meno di 20 metri di lato (vedi Figura 2).

Nel campo del livello dei mari DORIS permette, ad esempio di monitorare le variazioni millimetriche annuali del livello del bacino del Mediterraneo. Una mappa animata, disponibile presso il sito dell'Aviso riportato nei riferimenti, mostra in maniera sintetica i risultati di questo monitoraggio.

Sempre sullo stesso sito è anche possibile visualizzare una mappa dei moti delle masse continentali, ora stabiliti e monitorati con precisioni mai ottenute in precedenza.

Questi risultati "finali" sono solo un aspetto delle misure geodetiche effettuate da DORIS e derivano dalla elaborazione delle misure di posizione fatte delle diverse stazioni terrestri del sistema. Un esempio di queste misure è riportato in Figura 3 dove si mostra la variazione nella posizione (nello spazio, da qui le tre coordinate) della stazione di Amsterdam nel tempo. Queste variazioni vengono poi ricondotte ai fenomeni geofisici in base a complessi modelli matematici.

La precisione con cui sono disponibili i rilievi effettuati con DORIS ha ovviamente ricadute un gran numero di settori non contemplati nel precedente elenco di applicazioni dirette. In particolare va notato che la disponibilità di riferimenti di posizione, in tre dimensioni, in diversi posti della crosta terrestre, è un elemento fondamentale per la geologia, la meteorologia, la climatologia e per molte altre discipline di interesse mondiale.

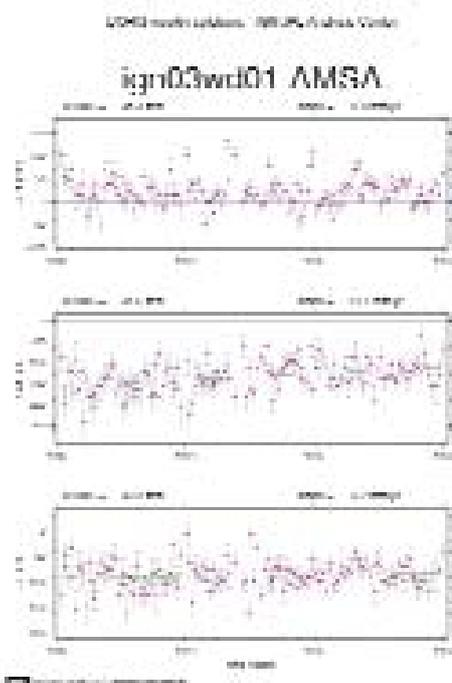


Figura 3 - Movimenti tridimensionali della stazione IDS di Amsterdam in quattro anni

## Conclusioni

La ricerca e la tecnologia spaziale offrono sempre spunti sulle cosiddette "ricadute" nel settore civile. Nel caso dei risultati ottenuti mediante la rete dell'International Doris Service parlare di "ricaduta" vuol dire banalizzare l'utilità di un sistema che nel corso degli anni potrà rilevarsi altrettanto fondamentale quanto i satelliti per telecomunicazione o quelli di navigazione.

La visione dei topografi di un sistema di riferimento globale ha già superato le più rosee aspettative di solo pochi decenni fa. Ora non solo esiste un riferimento di alta precisione ma si tratta anche di un riferimento dinamico che permette di monitorare il ciclo vitale dell'intero pianeta e le conseguenze che questo ha, o avrà, per il futuro dell'uomo.

## Il servizio internazionale per la rotazione terrestre IERS (International Earth Rotation Service)



Il servizio internazionale per la rotazione terrestre IERS (*International Earth Rotation Service*) è stato istituito nel 1987 dalla *International Astronomical Union* e dalla *International Union of Geodesy and Geophysics* e ha iniziato la sua attività nel Gennaio 1988. Nel 2003 fu rinominato *International Earth Rotation and Reference Systems Service*.

L'obiettivo primario dello IERS è quello di fornire alle comunità astronomiche, geodetiche e geofisiche quanto segue:

- Il sistema di riferimento Spaziale ICRS (*International Celestial Reference System*) e la sua realizzazione ICRF (*International Celestial Reference Frame*).
- Il sistema di riferimento Terrestre ITRS (*International Terrestrial Reference System*) e la sua realizzazione ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), ETRF in Europa.
- I parametri di orientamento della Terra richiesti per studiare le variazioni di orientamento della Terra necessari alla trasformazione tra ICRF e ITRF (o ETRF).
- I dati geofisici per interpretare le variazioni spazio/tempo nei sistemi ICRF, ITRF (ETRF) o i parametri di orientamento per modellare tali variazioni.
- Standards, costanti e modelli (convenzioni) per incoraggiare l'adesione internazionale.

Il termine "Earth orientation", a cui si riferiscono i parametri di orientamento della Terra, fa riferimento alla direzione nello spazio di assi che sono stati definiti sulla Terra. E' misurata usualmente con 5 quantità:

- due angoli che identificano la direzione dell'asse di rotazione terrestre rispetto alla Terra stessa un angolo che descrive il moto di rotazione della Terra
- due angoli che caratterizzano la direzione dell'asse di rotazione terrestre rispetto allo Spazio.

Con questi parametri l'orientamento della Terra nello Spazio è completamente definito. Il servizio fornito dal *Rapid Service/Prediction Center* dell'ITRS collocato all'interno del *U.S. Naval Observatory (USNO)*, effettua il monitoraggio dell'"Earth's orientation" e distribuisce questa informazione a molte organizzazioni con continuità.

<http://www.iers.org/>, <http://maia.usno.navy.mil/>

## Riferimenti

ESA Cryosat Launch Event press kit  
ESA Bulletin 122, May 2005  
Sito AVISO - <http://www.jason.oceanobs.com/>  
Sito IDS - <http://ids.els.fr/>

*Se non altrimenti indicato le figure sono tratte dal sito dell'AVISO (vedi Riferimenti).*

## Autore

FABRIZIO BERNARDINI

Email: [fb@aec2000.it](mailto:fb@aec2000.it)



GLOBO Srl è la società del gruppo IMteam orientata alla progettazione ed alla realizzazione di Sistemi Informativi Geografici sia per Enti Pubblici che per Aziende private.

Principali ambiti di intervento: CATASTO, PROTEZIONE CIVILE, URBANISTICA, PATRIMONIO IMMOBILIARE, VERDE URBANO, GEOMARKETING e molti altri ancora!

Per informazioni: E-mail: [globo@imteam.it](mailto:globo@imteam.it) WEB: [www.imteam.it](http://www.imteam.it)  
Via Sigismondi, 40 - 24078 Villa d'Almè (BG)

Tel 035 636029 Fax 035 638129