

Anche in questo numero di parla di una sonda interplanetaria che inizia la sua avventura scientifica intorno ad un altro corpo celeste. I successi conseguiti dalla scienza astronautica in questo campo sono continui, basti ricordare, oltre appunto a Venus-Express anche Mars Express, Stardust, Mars Reconnaissance Orbiter e le continue meraviglie che ci offre la missione Cassini (in orbita intorno a Saturno). Viene spesso naturale chiedersi come sia possibile, soprattutto da grande distanza, navigare sonde interplanetarie con le incredibili precisioni richieste dalle rispettive missioni. Non si tratta ovviamente solo di esperienza ma anche di tecniche che, come spesso accade in questo contesto, sono applicazioni di diverse soluzioni già note in campo terrestre ed in particolare ai lettori di GEOmedia.

Una premessa

Va subito ricordato che la navigazione interplanetaria è soggetta a leggi inesorabili ma allo stesso tempo ben note. I lenti (apparentemente) spostamenti tra i pianeti sono governati dalla legge di attrazione universale alla quale di aggiungono fenomeni perturbativi che per quanto di minima entità vengono doverosamente tenuti in considerazione. Uno di questi è, ad esempio, la pressione solare che il vento solare esercita sulle superfici esposte di una sonda. Per quanto lieve essa sia, è costante e a lungo andare produce una variazione di traiettoria.

Le missioni interplanetarie, inoltre,

Navigare con precisione nell'infinito (o quasi)

di Fabrizio Bernardini

sono praticamente avulse da manovre ad alta dinamica: persino le rotazioni di una sonda vengono gestite nell'arco di molti minuti, se non per i critici momenti di inserimento in orbita o di correzione di una traiettoria; ma anche in tal caso le manovre sono calcolate e simulate con grande anticipo e tutte le possibili evenienze sono contabilizzate per evitare sorprese.

Le sonde interplanetarie non possono navigare autonomamente (almeno per ora) e la loro *navigazione* deve essere gestita completamente da Terra.

Un esempio

Diversamente dalle sonde Europee Mars Express e Venus Express, la sonda statunitense Mars Reconnaissance Orbiter sta lentamente raggiungendo l'orbita operativa (dopo un inserimento iniziale intorno a Marte effettuato con una prolungata accensione dei motori principali) mediante una procedura nota come

aerobraking nella quale l'orbita ellittica viene gradualmente modificata con qualcosa come circa 700 passaggi negli strati superiori dell'atmosfera del pianeta. Questa tecnica è necessaria per ridurre in maniera considerevole la

quantità di propellente recata a bordo, dando così maggiori opportunità di carico per le strumentazioni scientifiche. Partendo da un'orbita fortemente ellittica e nota con grande precisione, i controllori a terra programmano per il periastro dell'orbita un breve passaggio nell'atmosfera. Il passaggio rallenta leggermente la sonda e abbassa la quota del successivo periastro.

Per poter gestire questa manovra occorre una grandissima precisione: basta esagerare di poco durante il passaggio al periastro che la sonda rischierebbe di essere danneggiata dal riscaldamento delle parti esposte all'attrito atmosferico o, peggio, di precipitare sul pianeta. Per questo motivo sono essenziali, soprattutto al termine di un passaggio nell'atmosfera, accurate misure di posizione della sonda per poter determinare come gestire il passaggio successivo.

Le tecniche usuali

Il legame fisico tra la Terra e una sonda in volo è costituito dalle onde radio che vengono scambiate tra le stazioni di terra preposte allo scopo e gli apparati di comunicazione di bordo. Tutti i metodi di misura della posizione e della velocità del veicolo spaziale sono perciò basati su tecniche a radiofrequenza. Ricordiamo che tutte le misure effettuate sono relative alla Stazione di Terra che le effettua. Nota la posizione di questa, ed essendo ben noti il moto di rotazione della Terra



Credit: NASA/JPL-Caltech

intorno al suo asse e quello di rivoluzione della stessa intorno al Sole, è possibile riportare la misura effettuata nel riferimento del sistema solare.

Innanzitutto è possibile determinare con buona precisione la velocità *radiale* del veicolo rispetto alla Stazione di Terra per mezzo delle variazioni di frequenza cui è soggetto il segnale radio a causa del moto relativo tra la sonda e la stazione (il ben noto Effetto Doppler). Si parla di velocità *radiale* perché con questo sistema è possibile determinare la componente di velocità che giace lungo la linea congiungente la Sonda con la stazione. Non esiste un modo diretto per determinare la velocità *laterale*.

E' anche possibile misurare la distanza tra la sonda e la stazione di terra misurando con quale ritardo determinati impulsi codificati, trasmessi da Terra, sono ricevuti di nuovo a terra dopo che gli apparati di navigazione di bordo li hanno rimandati per così dire *al mittente*. Poiché i ritardi del sistema sono noti e calibrati le misure di distanza sono tipicamente affidabili e limitate solo dalla risoluzione dei codici impiegati. Si noti che questa tecnica è alla base anche della misura della distanza satellite-ricevitore nei sistemi di navigazione satellitare (GPS, Glonass, Galileo).

Con diverse misure di distanza e velocità radiale è possibile alimentare un modello matematico che permetta di risalire alla traiettoria che soddisfa le diverse misure e, dunque, determinare posizione e velocità assolute della sonda. Grazie alle leggi della gravitazione non sono molte le soluzioni da analizzare per trovare quella che soddisfa le misure effettuate.

Per determinare la posizione della sonda nel cielo in modo più diretto (e più preciso) occorrono anche misure di tipo angolare che, tuttavia, non sono praticabili a grande distanza dalla Terra. Le antenne paraboliche tipicamente usate per le missioni interplanetarie possono essere puntate con una precisione del millesimo di grado, ma questo non è ancora sufficiente per una determinazione della posizione. Se si utilizzano due stazioni è però possibile effettuare due tipi di misure angolari utilizzando le tecniche prima descritte.

In un primo caso (detto *Precision*

Ranging) è possibile spingere al massimo la misura di distanza (si potrebbe arrivare anche al metro di accuratezza) ed eseguire diverse misure sincronizzate da due diverse stazioni. In base alla geometria tra le due stazioni e la sonda, è possibile con molte misure determinare la posizione di quest'ultima con tecniche di triangolazione.

In un secondo caso è possibile misurare la *variazione* nello spazio (cioè in 3 dimensioni) della posizione della sonda effettuando analoghe misure sincronizzate dell'effetto Doppler che apparirà di diversa entità a due stazioni a grande distanza una rispetto all'altra.

In entrambi i casi queste misure richiedono di correggere un gran numero di possibili sorgenti di errore, che vanno dalle distorsioni atmosferiche, alla sincronizzazione dei tempi, alla stabilità dei generatori di frequenze. In principio è però possibile, con un adeguato numero di misurazioni, ottenere informazioni di velocità accurate al centesimo di millimetro per secondo e di posizione angolare alla decina di nano-radiani (1 nano-radiante = 10^{-9} radianti).

Una nuova tecnica

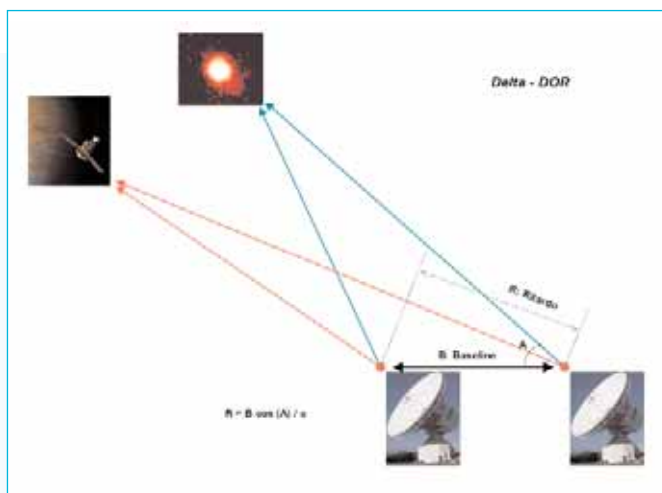
Le missioni cosiddette *deep space* più recenti godono di una nuova tecnica di misura della posizione basata su VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) o Interferometria su Base Molto Ampia, già ben nota in Geodesia ed Astronomia.

Questa tecnica si basa sull'impiego di due stazioni di terra poste a grande distanza tra loro (una condizione facilmente conseguita sia nella rete DSN della NASA che dalla rete analoga dell'ESA) che osservano alternativamente la sonda oppure un Quasar. I Quasar (*Quasi-stellar Radio Source*) sono oggetti astronomici a grandissima distanza dalla Terra la cui emissione è ricevibile solo con radiotelescopi e la cui posizione angolare è nota con grande precisione. L'utilizzo dei Quasars permette di compensare tutta una serie di errori di sistema e soprattutto di sincronizzare la ricezione dei segnali della Sonda con elevata precisione.

In pratica, una possibile procedura d'impiego di questa tecnica, nota come *Delta-DOR* (dove DOR sta per *Differential One-way Ranging*) prevede quanto segue. Le stazioni osservano per qualche minuto lo stesso Quasar (scelto in modo che la sua posizione angolare sia prossima a quella della sonda). Poi contemporaneamente, e senza smettere di registrare i dati, si spostano per ricevere per qualche minuto il segnale della sonda. Infine le due stazioni tornano ad *osservare* il Quasar. Dalle misure effettuate sul Quasar è possibile sincronizzare gli istanti di ricezione delle due stazioni. Effettuata la sincronizzazione, e compensati i moti della Terra, è possibile allora ricavare dalle registrazioni delle misure di distanza dalla sonda che, negli stessi istanti, risulteranno diverse per le due stazioni.

Si noti che il segnale proveniente dal Quasar è estremamente debole al punto tale da essere a malapena discernibile dal rumore di fondo nei ricevitori delle stazioni di terra. Tuttavia la ricezione contemporanea da due stazioni, e l'utilizzo di tecniche di correlazione, permette di stabilire con precisione la differenza temporale nella ricezione del Quasar tra le due stazioni.

Il termine delle procedura si ha quando, ottenute le misure di distanza, è possibile calcolare, di nuovo mediante triangolazione, la posizione angolare della sonda rispetto alle due stazioni di terra. Uno dei vantaggi della tecnica Delta-DOR sta nel fatto che è possibile ottenere una valutazione di posizione anche in tempi relativamente brevi (l'intero processo potrebbe durare anche solo una ventina di minuti), condizione indispensabile per la valutazione in





La nuova Stazione di Terra dell'ESA per missioni 'deep space', situata a Cebreros, in Spagna. La parabola ha un diametro di 35 metri. Una stazione analoga è situata a Nuova Norcia, in Australia.

Credits: European Space Agency/ESA



Una delle antenne da 70 metri di diametro della Deep Space Network della NASA. I centri DSN sono situati a Goldstone, California (in figura), Madrid, Spagna e Canberra, Australia. La disposizione sul globo terrestre garantisce una copertura costante delle missioni in atto, indipendentemente dalla rotazione terrestre.

Credits: NASA/DSN

La chiave di volta per tutte le missioni interplanetarie è l'infrastruttura di comunicazioni realizzata per mantenere il contatto con Sonde che si trovano ben oltre i confini del sistema solare (come le Sonde Voyager e Pioneer). Quando la potenza ricevuta a Terra ha valori infinitesimali occorrono antenne di enormi dimensioni per raccogliere una quantità di segnale sufficiente a poter essere amplificata da dispositivi avanzati raffreddati vicino allo zero assoluto con elio liquido (per ridurre il rumore di fondo generato localmente). Tecniche avanzate di codifica del segnale trasmesso dalle sonde sono state inoltre sviluppate e vengono aggiornate con il passare degli anni per poter affrontare sfide sempre di complesse.

La Deep Space Network della NASA è un luogo di eccellenza tecnologica al pari dei più grandi centri di ricerca scientifica del pianeta e la sua portata non si limita solo agli apparati per comunicazioni, ma si estende al trattamento dei dati e partecipa attivamente alla gestione delle diverse missioni per poter coordinare efficacemente l'utilizzo degli impianti disponibili. Ad esempio, se una Sonda si trova ad affrontare una manovra importante oppure ha un'unica opportunità di osservazione di un determinato oggetto, la DSN viene utilizzata in maniera da garantire in ogni istante della fase critica la disponibilità di sistemi di comunicazione primari e ridondati.

Anche l'Agenzia Spaziale Europea ha una rete per comunicazioni 'deep space' composta per ora da due stazioni principali ed una serie di stazioni, con antenne di dimensioni minori, utilizzate soprattutto per il "traffico" più prossimo alla Terra (come le varie missioni scientifiche e di telerilevamento in orbita intorno al nostro pianeta). Accordi di collaborazione internazionale, ed una forte standardizzazione nei segnali e nelle procedure, permettono all'ESA di accedere alle risorse della DSN in caso di necessità o per garantire la copertura costante in corrispondenza di eventi particolari.

tempo reale del risultato di una manovra interplanetaria in prossimità di un pianeta. Il sistema offre grande precisione e richiede di conoscere con altrettanto grande precisione la posizione nel sistema di riferimento terrestre delle due Stazioni di Terra coinvolte nelle misure.

Questa posizione, che poi definisce le caratteristiche della Linea di Base nella tecnica VLBI, si ricava anch'essa mediante una serie di misure interferometriche effettuate su diversi Quasar. Queste misure devono essere ripetute per via delle variazioni nella posizione dell'asse terrestre (diversi metri nell'arco di un decennio) e per via della deriva continentale. E' riportato che la posizione delle antenne della rete DSN della NASA è nota con una precisione di 3 centimetri.

Nota finale

Esiste anche una tecnica di raffinamento della nozione di posizione di una sonda basata su misure effettuate a bordo della stessa. In particolare si usano spesso le camere da ripresa (siano esse scientifiche o dedicate a compiti di navigazione) per riprendere il campo stellare intorno a corpi planetari in prossimità della sonda (per esempio nei giorni precedenti l'inserimento in orbita). Tramite diverse di queste immagini è possibile, a terra, calcolare la posizione e la velocità della sonda sia per raffinare i risultati ottenuti con i metodi sopra descritti, sia anche per ottenere una verifica indipendente, ottenuta con altri metodi, della stima di posizione.

Sebbene questa tecnica si basi su misure effettuate a bordo siamo ancora lontani dalla realizzazione di un sistema di navigazione autonomo che soddisfi i sempre più stringenti vincoli di localizzazione imposti dalle moderne missioni scientifiche.

Riferimenti:

http://www.esrin.esa.it/SPECIALS/Mars_Express/SEMS5N474OD_0.html

<http://www2.jpl.nasa.gov/basics/bsf13-1.html>

<http://www.electronicstalk.com/news/bae/bae114.html>

<http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsn/>

<http://www.esa.int/spacecraftops/>

Autore

FABRIZIO BERNARDINI
fb@acc2000.it