

# Galileo: orologi atomici e ridondanze

di Gianluca Pititto

**Alcuni malfunzionamenti a bordo dei satelliti Galileo rischiano di inficiare i risultati del sistema di posizionamento satellitare che sono condizionati al buon funzionamento degli apparati ad alta tecnologia del sistema, in particolare gli orologi atomici, che sono i responsabili della accuratezza del dato di navigazione.**



Gli orologi atomici Passive Hydrogen Maser di Leonardo-Finmeccanica a bordo dei satelliti Galileo (Foto Leonardo-Finmeccanica)

**I**l lungo e complesso sviluppo del progetto Galileo ha raggiunto una storica milestone il 15 dicembre del 2016, con l'entrata ufficiale nella fase operativa, pur non essendo ancora completato il deploy dell'intera costellazione. I primi 18 satelliti – sui 24 totali più altri 6 di backup- sono stati posizionati con successo nei tre previsti piani orbitali a 56° gradi di inclinazione equatoriale ed hanno iniziato a trasmettere dati di navigazione e di tempo al segmento utente finale. Sono stati attivati tre servizi di base, i cosiddetti *Galileo Initial Services* (navigazione “open” con precisione 1 metro, navigazione criptata per agenzia governative, servizio *Search-And-Rescue* integrato

con il sistema Cospas-Sarsat). A completamento della costellazione saranno disponibili servizi aggiuntivi, tra cui la navigazione precisa al centimetro, grazie anche alla interoperabilità di Galileo (Europa) con i sistemi GPS (USA) e GLONASS (Russia). Tutti questi risultati sono ovviamente condizionati al buon funzionamento degli apparati ad alta tecnologia del sistema. Tra questi assumono particolare importanza gli orologi atomici installati a bordo dei satelliti, responsabili della accuratezza del dato di navigazione e che purtroppo hanno mostrato qualche malfunzionamento negli ultimi due anni di attività sperimentale ed operativa di Galileo.

Vale la pena di descrivere brevemente come è strutturato il complesso sistema degli orologi di bordo, per meglio descrivere le anomalie che sono state riscontrate.

Giova anzitutto ricordare che il calcolo della propria posizione da parte del ricevitore è basato sulla conoscenza molto accurata, per ogni segnale ricevuto da Galileo, delle coordinate spaziali del satellite che ha emesso il segnale e del preciso istante in cui il segnale è stato emesso. L'accuratezza del segnale temporale è di vitale importanza per il corretto funzionamento del sistema: per averne un'idea, basti pensare che un errore di un nanosecondo (miliardesimo di secondo) sul calcolo del ritardo temporale del segnale

nel transito dal satellite al ricevitore introduce un errore medio di 30 cm nel calcolo della posizione del ricevente (1 msec=300mt).

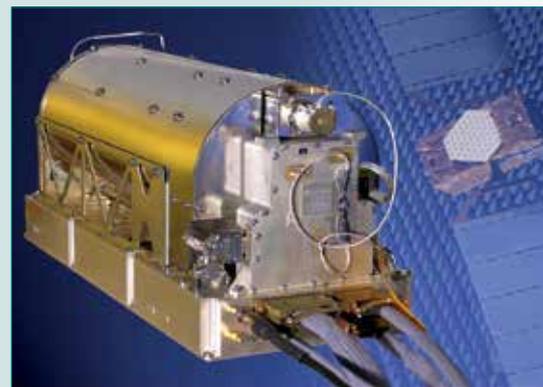
Queste due informazioni sono incapsulate nel segnale stesso e con esso sono trasmesse a terra dai satelliti. I valori trasmessi sono continuamente monitorati da una rete globale di terra (*GSS – Galileo Sensor Stations*), costituita essenzialmente da sensori che captano i segnali e che li convogliano verso 2 centri di controllo (*GCC – Galileo Control Center*), rispettivamente in Italia (Fucino) e Germania (Oberpfaffenhofen), che utilizzano le informazioni per calcolare la loro integrità e sincronizzare il segnale di tempo dei satelliti con un riferimento temporale generato a terra (*GST – Galileo System Time*) presso i due GCC, ottenuto da orologi atomici al cesio molto stabili, che vantano una accuratezza di 28 miliardesimi di secondo. I segnali di correzione, sia relativi al tempo sia alle posizioni orbitali, sono inviati ai satelliti tramite una rete di *uplink*, consentendo così che le informazioni incapsulate nei segnali trasmessi dai satelliti verso terra si mantengano al livello di accuratezza adeguato per il calcolo di posizionamento che verrà effettuato dai ricevitori. La precisione standard così ottenuta è dell'ordine del metro.

Il dato temporale che i satelliti inviano a terra ai ricevitori è ottenuto grazie orologi atomici installati a bordo di ciascun satellite. Gli orologi atomici sono estremamente accurati e basano il loro funzionamento sulla variazione dello stato energetico degli elettroni di un atomo, variazione indotta in vario modo (luce, laser, maser). Forzando gli atomi a passare

da uno stato energetico ad un altro viene emessa una radiazione a microonde di frequenza estremamente stabile, utilizzata per la generazione del segnale temporale.

Su ogni satellite di Galileo sono presenti 4 orologi atomici: 2 basati sulle caratteristiche atomiche del Rubidio (*RAF – Rubidio Atomic Frequency*) e 2 maser all'idrogeno passivo (*PHM – Passive Hydrogen Maser*). Il primo tipo impiega le transizioni energetiche del rubidio ed è stato già utilizzato su molti sistemi di navigazione, tra cui le missioni preliminari di Galileo GIOVE A e GIOVE B. Il secondo è di nuova concezione e fa uso di una transizione ultra stabile degli atomi di idrogeno ad 1,4 GHz: è stato progettato per ottenere accuratezze più elevate ed è l'orologio "master" di Galileo. Pertanto, sui 18 satelliti attualmente in orbita ci sono 36 orologi di ciascuno dei due tipi (72 in totale). La ridondanza di orologi sui satelliti è stata decisa proprio per fronteggiare il caso di malfunzionamento o blocco di questi dispositivi e consentire una loro immediata sostituzione operativa.

Cosa è accaduto negli ultimi due anni? I tecnici hanno riscontrato anomalie bloccanti in 3 orologi di tipo RAF ed in 6 orologi di tipo PHM. Un totale di 9 orologi malfunzionanti, che hanno interessato 5 dei 18 satelliti in orbita. Va subito precisato che grazie alla ridondanza quadrupla appena descritta su ciascun satellite restano al momento almeno 2 orologi funzionanti, per cui tutti i 18 elementi della costellazione hanno continuato ad operare e Galileo nel suo insieme ha continuato a funzionare senza interruzioni nell'erogazione dei servizi.



#### L'OROLOGIO ATOMICO DI FINMECCANICA

Il Passive Hydrogen Maser (PHM) realizzato da Finmeccanica-Selex ES a Nerviano è il più stabile orologio atomico mai realizzato per applicazioni spaziali grazie ad una stabilità di frequenza che equivale ad uno scarto di un secondo ogni tre milioni di anni. Sulla base della sua straordinaria stabilità, l'orologio all'idrogeno viene utilizzato per attività che richiedono elevati livelli di precisione, quali la localizzazione, il cronometraccio e altre applicazioni di bordo.

Il Maser viene installato su ciascuno dei satelliti della Costellazione Galileo, il più sofisticato sistema di navigazione satellitare ad uso civile mai realizzato. Il Maser viene impiegato per "segnare il tempo" di tutti i satelliti della costellazione, garantendo una precisione che nessun orologio spaziale ha mai avuto prima. L'eccellente stabilità di frequenza del Maser garantisce infatti la precisione richiesta dal sistema Galileo per più di otto ore, senza alcuna sincronizzazione da parte del controllo a terra. La tecnologia sviluppata da Finmeccanica-Selex ES consente di determinare con assoluta precisione la posizione di un ricevitore poiché, nella misura del tempo, un errore di un miliardesimo di secondo equivale ad un errore di 30 cm nella valutazione della distanza.

Finmeccanica-Selex ES è oggi impegnata, oltre che nella produzione dei Maser per la costellazione Galileo, anche nella miniaturizzazione e riduzione dei consumi di questo prodotto attraverso la realizzazione del Mini Maser, con l'obiettivo di imbarcarlo a bordo di Galileo Second Generation (G2G), la seconda generazione di satelliti della costellazione Galileo.

(Finmeccanica-Selex)

Tuttavia, indagini sono in corso con immaginabile solerzia in ESTEC, in affiancamento ai produttori degli orologi (Spectratime) e dei satelliti (Airbus e Thales Alenia Space; OHB e SSTL). In particolare, per le anomalie negli orologi RAF l'attenzione si è focalizzata su due possibili cause: dei corto circuiti, oppure effetti impreveduti di una procedura di test effettuata a terra. Per quanto concerne invece gli orologi PHM sono state identificate due cause differenti con buon margine di certezza: una dovuta ad un particolare parametro con un margine troppo basso (cosa che ha creato una condizione di errore), l'altra dovuta al mancato riavvio di alcuni orologi, dopo essere stati spenti per un periodo lungo e causata da alterazioni occorse per le condizioni orbitali. Due orologi PHM hanno avuto verosimilmente il primo problema, altri 4 hanno invece sperimentato il secondo. Un elemento che può rivelarsi interessante per le indagini in corso riguarda l'origine dei satelliti interessati. Il lancio in orbita della costellazione è iniziato nel 2005 con una prima generazione di 4 satelliti, che hanno dato vita alla cosiddetta fase IOV (*In Orbit Validation*), una fase preliminare di test approfonditi per la validazione dell'infrastruttura e dei segnali. Ad una seconda generazione di satelliti appartengono invece i successivi 14 elementi lanciati nel corso degli anni a seguire (a partire dal 2011) e che hanno costituito la fase detta di FOC (*Full Operational Capability*), peraltro ancora da completare con i satelliti rimanenti. Detto questo, i 3 orologi RAF che hanno mostrato problemi appartengono tutti alla serie FOC, mentre dei 6 orologi

PHM malfunzionanti 5 appartengono alla serie IOV ed uno alla FOC. Visto in termini di satelliti: 3 dei 4 satelliti IOV sono "affetti" da anomalie, come pure 2 dei 14 satelliti FOC.

Altro elemento di interesse proviene dall'Agenzia Spaziale Indiana, con cui ESA è in contatto: gli indiani stanno utilizzando per proprie missioni gli stessi orologi al rubidio e sono in corso scambi di informazioni sul loro funzionamento ed eventuali problemi.

Attualmente lo staff tecnico e manageriale in che gestisce il problema si trova di fronte ad un bivio decisionale. Come ha affermato in conferenza stampa il direttore generale di ESA - Jan Woerner - si tratta di decidere se continuare i lanci dei satelliti rimanenti secondo la pianificazione già programmata, oppure sospendere i lanci già schedulati ed attendere l'identificazione certa delle cause dei problemi occorsi. Entrambe le opzioni hanno pro e contro, per cui sono ambedue praticabili. Nel primo caso si riuscirebbe perlomeno a preservare le prestazioni di Galileo, ma con il rischio di non individuare pienamente un eventuale errore di sistema; nel secondo si giungerebbe ad identificare compiutamente il problema, ma con il rischio che eventuali malfunzionamenti di altri orologi potrebbero portare ad una riduzione delle prestazioni dell'intera infrastruttura.

Nel frattempo si stanno pianificando azioni mirate a prevenire ulteriori problemi. In particolare, sono in corso di analisi differenti modalità operative per gli orologi una volta posti in orbita. Si stanno inoltre adottando leggere modifiche degli orologi che sono

prossimi al lancio, mentre per quelli di futura costruzione si sta pensando a vere e proprie modifiche progettuali.

Resta il fatto che grazie alla ridondanza degli orologi su ciascun satellite ci sono al momento almeno 2 orologi funzionanti, per cui fortunatamente i servizi di Galileo non hanno risentito dei problemi fin qui descritti.

L'attuale obiettivo di ESA è dunque quello di confermare il lancio dei prossimi 4 satelliti della costellazione perlomeno entro la fine dell'anno. Gli ultimi quattro sono stati lanciati il 17 novembre 2016 con un modello particolare del vettore europeo Ariane 5, che in un solo lancio ha portato in orbita 4 satelliti.

Il costo complessivo di Galileo si stima in circa 7 miliardi di euro da qui al 2020, anno in cui si punta a completare lo spiegamento dell'intera infrastruttura.

#### PAROLE CHIAVE

GALILEO; OROLOGIO ATOMICO; POSIZIONAMENTO SATELLITARE

#### ABSTRACT

Galileo atomic clocks and redundancies. Some malfunction on board of Galileo satellites are likely to affect the results of the satellite positioning system. The contingent problems upon the proper functioning of the system's high-tech equipment, in particular atomic clocks, could be responsible for the loss of accuracy of the navigation data.

#### AUTORE

GIANLUCA PITITTO  
GPITITTO@RIVISTAGEOMEDIA.IT  
RIVISTAGEOMEDIA.IT

PRESENTA HIPER HR

# CONNETTIVITÀ AVANZATA



FORMA  
E FUNZIONE



ALTAMENTE  
CONFIGURABILE



PRESTAZIONI  
SUPERIORI



A PROVA  
DI FUTURO

## MODERNA TECNOLOGIA DI POSIZIONAMENTO IBRIDO

Traccia tutti i segnali satellitari con la versatilità di gestire qualsiasi progetto. La tecnologia all'avanguardia, brevettata di HiPer HR, offre elevata ripetibilità di posizionamento in un design compatto.