

BUSSOLA

Grazie ai sistemi di geolocalizzazione riusciamo a orientarci usando il cellulare.

Come fanno i satelliti a guidare i nostri spostamenti

Calcoli a velocità della luce, orologi atomici e stazioni di terra: i segreti del sistema di navigazione Galileo

di Vito Tartamella

Sono alla Barriera autostradale di Roma Est. Devo andare alla stazione Termini a prendere il treno delle 17:20 per Milano. Sono le 16, ho poco più di un'ora: qual è la strada più veloce per arrivare in tempo? Digito la destinazione sul telefono. Attivo la posizione, e subito Google Maps mi propone due percorsi alternativi: uno da 20,3 km e uno da 22 km. Il più veloce è quello che passa più a nord, su via Tiburtina: ci metterò 29 minuti. Come funziona la geolocalizzazione? E come fa Google Maps a guidarci, stimando in tempo reale itinerari e tempi di viaggio?

QUESTIONE DI TEMPO

Il segnale di un satellite ci arriva dallo spazio in 84 millesimi di secondo: un battito di ciglia dura il doppio. Eppure, in questo istante si svolgono migliaia di calcoli, i cui risultati corrono via radio fra decine di satelliti che orbitano a 26mila km di quota, 70 stazioni di ricezione sparse su tutta la Terra, e... i chip del mio telefono, che ricava la propria posizione risolvendo equazioni sulla posizione di 4 e più satelliti.

Una sfida che si gioca alla velocità della luce (300mila km al secondo), alla quale viaggiano i

segnali radio: un milionesimo di secondo di ritardo nell'elaborazione dei segnali, infatti, ci porterebbe fuori strada di 300 metri. Un procedimento complesso: per ricavare la posizione dei satelliti bisogna considerare che il tempo sui veicoli spaziali scorre in modo diverso che sulla Terra. E' uno degli effetti della legge della Relatività di Einstein: viaggiando a oltre 25mila km orari ed essendo sottoposti a minor forza di gravità, gli orologi a bordo dei satelliti sono avanti di 38 microsecondi (milionesimi di secondo, v. *infografica*): senza le correzioni degli algoritmi di sincronizzazione, sbaglierebbero posizione di 11 km.

Ecco perché il cuore dei sistemi di geolocalizzazione sono gli orologi atomici, i soli a garantire una precisione quasi assoluta: sono montati a bordo dei satelliti, e altri - ancor più precisi - sono nei centri di controllo a Terra. «La geolocalizzazione è come un sistema di orologi che si sincronizzano via via fra loro in modo ciclico fra la terra e lo spazio» spiega l'ingegner Marco Brancati, direttore tecnico e dell'innovazione di Telespazio (gruppo Leonardo).

Sono andato a vederlo con i miei occhi nel più grande teleporto civile del mondo: il Centro spaziale del Fucino. In questa conca circondata dagli Appennini, dove un tempo c'era un lago, svetta- ▶

GEOLOCALIZZAZIONE

Focus dossier

CONTROLLO

La sala comandi di Galileo, al teleporto del Fucino: qui si sincronizzano gli orologi dei satelliti con quelli di Terra (più precisi). Per monitorare la costellazione ci sono 60 stazioni radio sparse su tutto il pianeta.



Fucino Space Centre

I satelliti controllano il traffico stradale, aereo e navale. E le operazioni finanziarie in Borsa

bile non solo per i nostri spostamenti quotidiani, ma anche per garantire il funzionamento del traffico aereo e navale, degli impianti energetici, delle piattaforme petrolifere, dei servizi di soccorso e delle transazioni finanziarie di Borsa, per le quali la costellazione autentica l'ora d'esecuzione grazie agli orologi atomici. E, in prospettiva, sarà il sistema di navigazione per le auto a guida autonoma. «Un sistema complesso, usato da oltre 4 miliardi di persone e protetto da rigidi protocolli di sicurezza a prova di hacker», sottolinea Candido Fracassi, responsabile operativo di Galileo. Un errore o un blackout del sistema avrebbero conseguenze globali, per quanto tamponate dalla presenza delle altre costellazioni globali come il Gps (Usa), Glonass (Russia) e Beidou (Cina) a cui i nostri ricevitori comunque si agganciano.

DAI SOTTOMARINI

«Il centro di controllo assorbe 3 Megawatt di energia», racconta Pompeo Di Nicola, engineering hosting Galileo. «Abbiamo 4 generatori d'energia elettrica a gasolio in grado, in caso di blackout, di fornire energia continuativa per una settimana, se necessario. E l'esperienza del Covid ci ha insegnato a separare le squadre che si occupano della costellazione Galileo da quelle che fanno il controllo missione, in modo da limitare i contagi in caso di malattie infettive».

Rispetto agli altri tre sistemi, Galileo è l'ultimo nato (opera dal 2016), ed è l'unico concepito, fin dall'inizio, per usi civili. Un'eccezione in un settore nato con scopi militari durante la Guerra Fredda: agli Stati Uniti serviva infatti un sistema per guidare i missili balistici lanciati dai sottomarini. E senza questa motivazione, probabilmente, non avrebbero speso i miliardi di dollari necessari a sviluppare una tecnologia così complessa. ▶

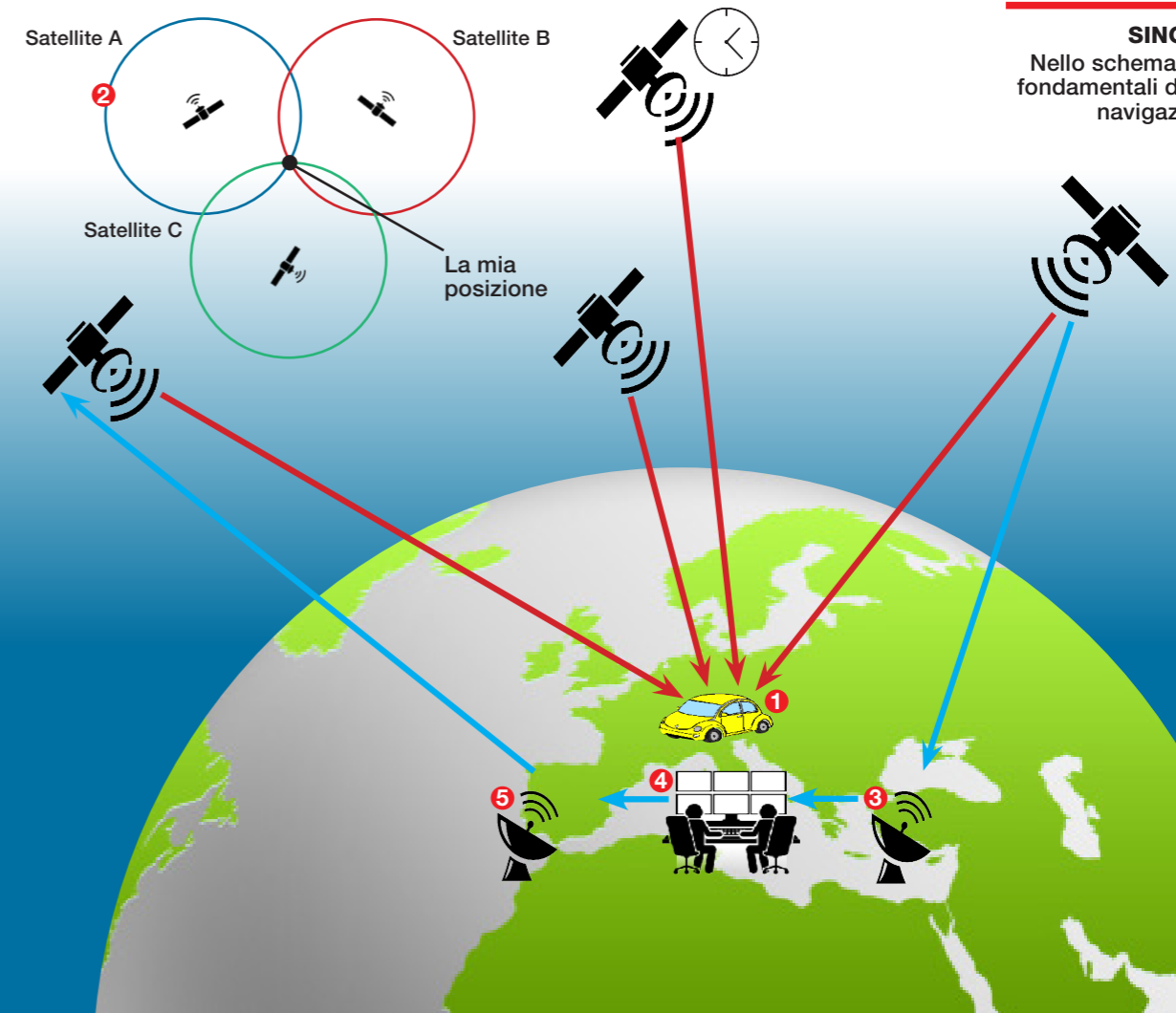
ANTENNA

Una delle grandi parabole al teleporto del Fucino: per controllare i satelliti della costellazione di Galileo ne viene usata una dozzina.



COSÌ I SATELLITI RICOSTRUISCONO LA NOSTRA POSIZIONE

Per determinare la nostra posizione sulla Terra, il ricevitore (1), uno smartphone dotato di Gns (Global navigation satellite system), riceve il segnale dai satelliti, che hanno una frequenza identificatrice unica. Sapendo a quale istante T1 il segnale è stato inviato, il ricevitore calcola la distanza (D) del satellite quando riceve il segnale nell'istante T2: $D = V(T2 - T1)$, dove V, la velocità del segnale radio, è quella della luce (300mila kms). Per determinare la nostra posizione occorrono almeno 3 satelliti (trilaterazione): con uno solo, potremmo essere in un punto qualunque della circonferenza immaginaria disegnata sulla superficie terrestre; con due satelliti potremmo essere in 2 punti (l'intersezione dei due cerchi immaginari). (2) Dato che la misura del tempo sul ricevitore non è precisa quanto quella dei satelliti (dotati di orologi atomici), per correggere gli errori di posizione occorre la misura di un quarto satellite che sincronizza gli orologi in orbita con quello sulla Terra. In realtà la nostra posizione è determinata con una decina e più satelliti. I satelliti di Galileo fanno un giro del mondo ogni 14 ore alla velocità di 25.200 kmh. Il loro segnale radio arriva sulla terra in 84 ms (millesimi di secondo). Oltre che dagli smartphone, il segnale dei satelliti è ricevuto da 40 stazioni di sensori (3) in ambo gli emisferi. Le stazioni inviano i dati sui satelliti (posizione e ora) al Centro di controllo del Fucino (4), che sincronizza gli orologi di Terra con quelli nello spazio. Secondo la Relatività di Einstein, infatti, più un oggetto va veloce, più il tempo scorre più lento: l'orologio del satellite è indietro di 7 microsecondi (millesimi di secondo). Ma dato che in orbita c'è meno forza di gravità, questo fa scorrere il tempo più velocemente di 45 microsecondi, portando il satellite a un anticipo complessivo di 38 microsecondi rispetto alla Terra. Se non fosse corretto, ci farebbe sbagliare posizione di 11,4 km. Il Centro di controllo corregge quindi il tempo del satellite e ne calcola le posizioni successive, comunicandole alle stazioni di caricamento (5), 20 in tutto il mondo: queste inviano al satellite i dati corretti ogni 80 minuti, facendo ricominciare il ciclo.



I NUMERI DI GALILEO






IN ORBITA.

24 satelliti su 3 piani orbitali a 26.000 km di quota
SEGMENTO DI TERRA.
 8 stazioni di tracciamento, 40 stazioni di sensori, 20 stazioni di caricamento, 2 centri di controllo
DAL 2016
ACCURATEZZA .20 cm

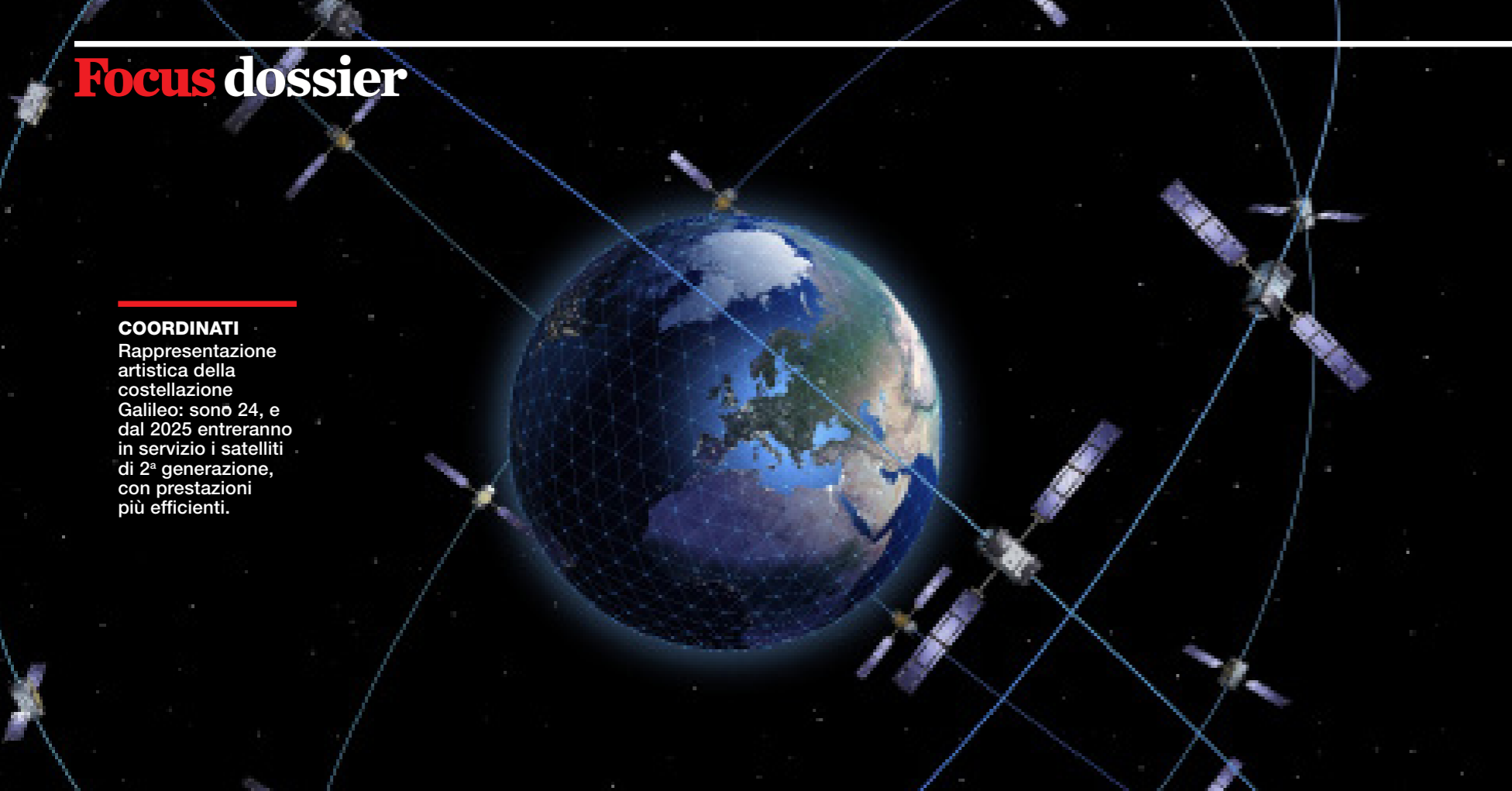
GLI ALTRI SISTEMI DI NAVIGAZIONE

GPS:

satelliti: 30 dal 1978 
 accuratezza: 30 cm
GLONASS
 satelliti: 24 dal 1982 
 accuratezza: 2 m
BEIDOU:
 satelliti: 28 dal 2000 
 accuratezza: 3,6 m

SINCRONIZZATI

Nello schema, gli elementi fondamentali del servizio di navigazione Galileo.



COORDINATI
Rappresentazione artistica della costellazione Galileo: sono 24, e dal 2025 entreranno in servizio i satelliti di 2ª generazione, con prestazioni più efficienti.

i civili. Solo dal 2000, per decisione di Bill Clinton, la differenza fu cancellata. Nel frattempo anche la Russia aveva lanciato il suo sistema di navigazione, Glonass. A quel punto anche l'Europa decise di rendersi autonoma, come aveva fatto in campo spaziale con l'Esa e in campo aeronautico con Airbus. Ma gli Usa fecero pressioni per far naufragare il progetto europeo: volevano il controllo totale della navigazione satellitare, così che, in caso di attacco sul proprio territorio (com'era avvenuto l'11 settembre 2001) avrebbero potuto spegnere o rendere impreciso il sistema per ostacolare i nemici. L'Europa resistette, e tentò di avviare il servizio con industrie private. Ma era divisa al suo interno: Italia e Francia appoggiavano il progetto, mentre Regno Unito, Germania e Paesi Bassi preferivano non investire e affidarsi al Gps. Per superare lo stallo, nel 2006 la Commissione Europea trasformò Galileo in un programma comunitario sotto la guida dell'Euspa (Agenzia dell'Unione europea per il programma spaziale) stanziando 10 miliardi di euro.

OGNI 80 MINUTI

Nel frattempo, i tecnici di Leonardo si dedicavano al cuore del sistema: gli orologi atomici. I satelliti Galileo ne montano 2 tipi diversi a bordo: uno all'idrogeno e uno al rubidio (un metallo liquido molto reattivo). E ciascuno ha un gemello di riserva, che si attiva in caso di guasti. Il più preciso è quello all'idrogeno: sbaglia un secondo ogni 3 milioni di anni.

«L'Esa voleva un orologio performante» ricorda Marina Gioia, responsabile degli orologi atomici di Leonardo. «Così bandì una gara che prevedeva una collaborazione con l'Osservatorio astronomico di Neuchâtel (Svizzera) che usava orologi all'idrogeno di terra molto performanti. Avevano un solo difetto: erano grandi come una lavatrice. Abbiamo lavorato per miniaturizzarli, e per renderli adatti a lavorare nello spazio, capaci di affrontare le sollecitazioni del lancio e l'ambiente spaziale. Gli orologi atomici sono sviluppati per resistere a variazioni di temperatura, vibrazioni e radiazioni elettromagnetiche senza compromet-

Per far funzionare la costellazione dei satelliti servono 70 stazioni di Terra

terne la precisione». Dopo anni di test a terra e in orbita, l'orologio all'idrogeno è stato montato su tutti i satelliti Galileo. Lungo 50 cm, largo 21 cm e alto 25 cm, pesa circa 18 kg assorbendo meno di 70 W di energia. E può resistere 12 anni nello spazio. Consiste in un serbatoio di idrogeno: gli atomi vengono eccitati da una scarica elettrica, e nel tornare allo stato originario emettono un fotone a una frequenza stabile di microonde: queste oscillazioni forniscono la base per misurare lo scorrere del tempo.

L'orologio del satellite deve sincronizzarsi con quelli a Terra, ancora più precisi non avendo le sollecitazioni e interferenze presenti in orbita. Al Fucino ce ne sono 8: 4 all'idrogeno, stabili sul lungo periodo, e 4 al cesio, stabili sul breve periodo. Sono custoditi in un locale blindatissimo, la "Precision Time Facility", con un sistema di condizionamento che mantiene la temperatura dei locali a 21 °C con la tolleranza di un solo decimo di grado.

Tutto questo perché il Centro del Fucino deve gestire e sincronizzare il tempo e il segnale di navigazione per i 24 satelliti di Galileo ogni 80 minuti. La costellazione è controllata, invece, dal Centro di Oberpfaffenhofen in Germania, gestito dalla Dlr, l'agenzia spaziale tedesca. Qui arrivano le telemetrie dei satelliti e da qui partono i telecomandi per la flotta. «I due centri di controllo sono complementari e speculari: possono darsi il cambio, invertendo le loro funzioni nel giro di 5 ore», sottolinea Di Nicola.

ANCHE SULLA LUNA

Ma Galileo non dorme sugli allori. È già in preparazione la seconda generazione di satelliti, 12, che saranno costruiti da Thales Alenia Space e Airbus. Il lancio è previsto dal 2025. Leonardo, intanto, sta lavorando su un nuovo orologio atomico totalmente *made in Italy*, quello al rubidio pulsato pompato elettronicamente: gli atomi sono eccitati da un laser. «Lo stiamo mettendo a punto con l'Inrim di Torino» dice Gioia. «Sarà testato per lo spazio nel 2025: pesa quasi la metà di quello all'idrogeno e consuma il 30% in meno di energia». Due qualità fondamentali nello spazio, dove peso ed energia fanno lievitare i costi di missione. E, in futuro, Galileo supererà i confini della Terra: Telespazio sta partecipando alla gara indetta dall'Esa per guidare "Moonlight", il consorzio che fornirà un sistema satellitare di navigazione per la Luna. «Sarà una flotta di meno di 10 satelliti», dice Fracassi. «Consentirà di guidare da remoto orbiter, rover e lander, offrendo la possibilità di esplorare anche il lato oscuro della Luna». **F**

NELLO SPAZIO

Un tecnico di Leonardo controlla l'orologio atomico a bordo dei satelliti Galileo: è il più preciso per le operazioni in orbita. Perde un secondo ogni 3 milioni di anni.



Le prime intuizioni risalgono al 1957, quando i russi lanciarono in orbita il primo satellite, lo Sputnik. Gli americani capirono come individuare la sua posizione intercettando le sue trasmissioni, modificate dall'effetto Doppler: un segnale radio, emesso da una sorgente in movimento, sembra avere una frequenza più alta se la sorgente si avvicina, e più bassa se si allontana da chi la rileva. L'anno dopo, il vicedirettore del Johns Hopkins Applied Physics Laboratory, Frank McClure, ebbe un'intuizione geniale: invertendo i calcoli, cioè conoscendo i parametri orbitali del satellite, si poteva ricostruire la posizione di una stazione ricevente sulla Terra, fornendo così un perfetto sistema di navigazione. Perciò nel 1960 esordì Transit: una costellazione di 5 satelliti che forniva una posizione di navigazione all'ora, con un margine d'errore di 200 metri. La precisione migliorò nel 1967, quando la Marina militare sviluppò Timation, il primo satellite con orologio atomico. E dal 1978 prese vita la costellazione Gps Navstar, riservata però ai soli militari.

IL DOPPIO BINARIO DEL GPS

L'allargamento agli usi civili fu deciso dal presidente Ronald Reagan dopo una tragedia: nel 1983, un Boeing della Korea Air Lines, che trasportava 269 passeggeri, fu abbattuto da un caccia sovietico perché, per un errore di navigazione, aveva sconfinato in uno spazio aereo vietato. Ma per anni il sistema Gps ha funzionato su un doppio binario: accurato per i militari, meno preciso per

ID	GNSS	CF	C/NO	DATI	ELEV.	AZIM
4	USA	L1	31,4	AU	19°	73°
5	USA	L1	17,0	A	13°	308°
7	USA	L1	30,6	AEU	71°	143°
9	USA	L1	15,7	AEU	49°	67°
11	USA	L1	23,3	AU	45°	263°
16	USA	L1	24,4	AU	11°	39°
30	USA	L1	22,6	A	47°	195°
5	USA	L1	27,3	AEU	43°	72°
14	USA	L1	17,6	AEU	13°	24°
15	USA	L1	25,1	AU	47°	71°
16	USA	L1	25,1	AU	35°	148°
21	USA	L1	12,1	AU	30°	260°
5	EU	E1	21,0	AU	72°	41°
9	EU	E1	25,6	AU	21°	75°
13	EU	E1	19,4	A	8°	331°
24	EU	E1	34,3	AU	20°	105°
25	EU	E1	22,7	AU	7°	154°
31	EU	E1	22,2	AU	20°	52°
34	EU	E1	15,7	A	37°	217°
5	CH	B1	25,7	AU	18°	121°
6	CH	B1	16,8	A	6°	49°
9	CH	B1	24,9	AU	17°	49°
14	CH	B1	22,0	AU	76°	334°
21	CH	B1	40,6	AEU	18°	103°
24	CH	B1	18,4	AEU	36°	164°
26	CH	B1	27,7	AEU	51°	93°

SEGNALATI

I satelliti visibili da uno smartphone in Italia per la navigazione: sono 26, e permettono di rilevare la posizione in modo preciso.