

Este artículo aparecerá publicado en el Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid para el año 2006.



Impresión artística del descenso en solitario de la sonda *Huygens* hasta la superficie de Titán, con paracaídas, tras separarse de *Cassini*. Una veintena de antenas en tierra fueron utilizadas para monitorizar el descenso, haciendo uso de técnicas sofisticadas de VLBI que se describen en el texto.

NAVEGACIÓN INTERPLANETARIA CON VLBI, USANDO LAS ESTRELLAS COMO REFERENCIA

María José Rioja Capellán

*Observatorio Astronómico Nacional
Instituto Geográfico Nacional*

Abstract

Exploration by spacecraft provides us with fascinating insights into, and increases of our knowledge of, the solar system. Since the first launch, in 1957, the history of astronautics and planetary exploration is one of space missions with ever increasingly ambitious goals. The development of technology and of navigation techniques are key factors in supporting this advance. In particular the application of ultra-precise space navigation techniques related to Very Long Baseline Interferometry (VLBI), such as Δ DOR and the “astronomical” configurations, provides the most accurate, inertial reference frame, orbit determination estimates. VLBI is a multi-disciplinary technique which historically stands out for providing the most accurate measurements of positions. This article is concerned with the usage of this technique in space navigation protocols, in particular the achievements in a number of recent space missions.

Introducción

La exploración espacial nos acerca al misterio encerrado en los mundos desconocidos, y a menudo las noticias despiertan gran expectacion más allá del círculo de profesionales trabajando en este campo. Este interés generalizado por el “más allá” representa la curiosidad innata al ser humano y su empeño por expandir los confines del conocimiento, en todos los campos de la ciencia.

Las misiones espaciales resultan un tema fascinante tanto por su vertiente tecnológica y la pericia requerida en la navegación espacial de una nave a millones de kilómetros de distancia de la Tierra, como por los nuevos conocimientos adquiridos sobre la Tierra, los planetas y el sistema solar. Estos últimos han proporcionado respuesta a una inmensidad de preguntas, y han generado no menos incógnitas científicas, contribuyendo así al avance del conocimiento.

La historia de la exploración espacial es muy reciente. La era espacial y la astronáutica arrancan con el lanzamiento de los primeros satélites artificiales, el *Sputnik 1* por la Unión Soviética el 4 de Octubre de 1957, y el *Explorer 1* por Estados Unidos el 31 de Enero de 1958. Estos acontecimientos supusieron el pistoletazo de salida de la carrera espacial entre las potencias de la época. En las dos décadas siguientes se llegaron a lanzar más de 1.600 naves espaciales de todo tipo, la mayoría destinadas a orbitar nuestro planeta, con diversos fines, entre ellos: investigación científica, comunicaciones, militares, meteorológicos, de reconocimiento fotográfico, sondas lunares y planetarias; se han enviado astronaves tripuladas en viajes de ida y vuelta a la Luna; los *Voyager 1* y 2 y por los *Pioneer 10* y *11* han enviado a la tierra fotografías apasionantes que incrementan inmensamente lo que se conocía sobre los planetas y sus satélites; hay dos robots desplazándose por la superficie de Marte; estamos esperando el retorno de una misión con muestras de material de un asteroide ... Mirando hacia atrás uno tiene la sensación de que los logros en la conquista del espacio siguen un ritmo vertiginoso y se suceden sin solución de continuidad.

Pero la historia de la exploración planetaria no está libre de “víctimas”, o misiones que no han llegado a cumplir su objetivo. En particular, Marte cuenta con una amplia casuística de misiones fracasadas, bien porque la nave no llegó a abandonar la Tierra, o porque sufrió una avería en la fase interplanetaria de aproximación a su objetivo, o pasó de largo por un error fatal en la navegación, o dejó de funcionar inmediatamente después de llegar a su destino. En concreto, el año 1999 fué especialmente malo. El *Mars Climate Orbiter*, supuestamente se abrasó al adentrarse unos 20 kilómetros más allá de la distancia de seguridad en la atmósfera de Marte, debido a un error en la conversión de unidades de longitud inglesas a metros. Tres meses más tarde, el *Mars Polar Lander*, su satélite gemelo, se estrelló contra la superficie del planeta porque los motores de frenado durante el descenso se apagaron antes de tiempo. Aunque, probablemente, una de las razones por las que ha habido tantos fallos es porque también ha habido muchos intentos. Marte, por su proximidad a la Tierra, es un destino favorito en las misiones espaciales.

Aún con todo, el número de misiones que han satisfecho, y a menudo excedido, sus objetivos científicos y tecnológicos superan con creces al de los fracasos.

Sin duda, el desarrollo de nuevas técnicas que garantizan una navegación más precisa de las naves espaciales ha jugado un papel fundamental en el avance en la conquista del espacio profundo. Su implementación, además de ayudar a evitar algunos de estos accidentes, ha permitido aumentar el grado de complejidad de las misiones, al permitir realizar maniobras cada vez más complicadas.

Navegación espacial

El objetivo de la navegación espacial es conducir la nave hacia su destino ajustándose a una trayectoria predefinida. Esta labor es responsabilidad de los miembros del equipo de vuelo de la misión, quienes diseñan las maniobras pertinentes para que la trayectoria real se ajuste a la planeada. Así pues, la determinación precisa de la órbita o trayectoria real seguida por la nave es de vital importancia para la navegación.

La navegación espacial se lleva a cabo desde las antenas parabólicas en los centros de control, ó estaciones de seguimiento de satélites, de las agencias espaciales en Tierra, ya que la nave no es visible para el ojo humano, ni siquiera utilizando telescopios. Estos centros constituyen el segmento terrestre de la misión espacial. Por su parte las naves están equipadas con múltiples antenas para utilizar en diferentes fases de la misión y que permiten la comunicación en todas direcciones, y con otros satélites. Dichas antenas abren un canal de intercambio de información entre los sistemas a bordo de la nave y los miembros del equipo de vuelo y permiten el control remoto desde Tierra. El análisis de las señales emitidas por la nave y recibidas en Tierra, usando técnicas tradicionales de telemetría (medidas “Doppler” y medidas de distancia o “ranging”) y otras incorporadas en los últimos años, permite conocer la posición y velocidad de la nave en todo momento, junto con otros parámetros dinámicos tales como la presión de radiación solar. Esta información es esencial para conducirla a su destino.

El servicio de navegación obtiene estimaciones de la velocidad a partir de medidas de la frecuencia de las radio señales – o más apropiadamente, del cambio de frecuencia entre la emitida desde la nave y la recibida en Tierra. Este fenómeno, conocido como efecto “Doppler” es similar al cambio escuchado en el tono de la bocina de un tren mientras se acerca o se aleja de nosotros. Las medidas Doppler en telemetría reflejan la velocidad relativa entre el transmisor a bordo de la nave y el receptor en la Tierra y permiten determinar la dirección con respecto a la antena en Tierra. Las medidas de la distancia se realizan mediante algo así como el envío de una señal desde la Tierra hasta la nave, y la recepción de su “eco”. El tiempo empleado en el viaje de ida y vuelta determina la distancia a la nave con una precisión de unos pocos metros, ¡aunque la nave pueda estar a varios cientos de millones de kilómetros de distancia!.

La incorporación de la técnica Δ DOR (Delta Differential One-way Ranging) a los protocolos de navegación espacial es más reciente. Esta técnica se viene utilizando en las dos últimas décadas y usa observaciones de cuásares – objetos celestes muy lejanos – para la determinación de la posición de la nave (Thornton y Border, 2003). Para ello se realizan observaciones desde dos antenas simultáneamente, alternando entre la nave y el cuásar. El observable fundamental en la aplicación de la técnica Δ DOR es la (“doble”) diferencia entre los tiempos de llegada de las señales de la nave y de la emisión natural del cuásar a dos antenas separadas por una gran distancia. Las diferencias “simples” en los tiempos de llegada se calculan mediante el procesamiento conjunto de las señales recibidas en ambas antenas, utilizando el algoritmo de correlación para el caso de la emisión del cuásar; y mediante la comparación de los tiempos de emisión, desde el satélite, y recepción, en Tierra, para la señal de la nave – similar al “ranging”, pero con un sólo viaje de ida. Cada una de ellas permite estimar la dirección de procedencia de la señal correspondiente con respecto a las antenas. La “doble diferencia” entre las medidas del satélite y el cuásar produce la cancelación de muchos errores comunes a ambas medidas, inducidos por la atmósfera y la instrumentación, y proporciona un observable mucho más preciso que los individuales. El observable “doble diferencia” permite estimar la separación angular entre la nave y el cuásar con alta precisión. La técnica Δ DOR podría verse como una configuración particular de la técnica radioastronómica de VLBI, que se considera en cierto detalle más adelante, y que destaca por proporcionar medidas ultra precisas de posiciones.

Mucho más reciente es la aplicación de la configuración “astronómica” de VLBI en la navegación espacial; quizás por ello su uso no es tan frecuente, comparado con la configuración Δ DOR, en los protocolos de navegación. Ambas configuraciones representan el “estado del arte” de las técnicas de navegación espacial. Más adelante se incluyen las conclusiones de un estudio comparativo entre ellas.

Para permitir el seguimiento continuado de los satélites con antenas que están fijas sobre la Tierra en rotación, la Agencia Espacial Norteamericana (NASA) dispone de tres estaciones de seguimiento estratégicamente distribuidas por el globo terrestre, en Europa (Robledo de Chavela, Madrid, España), Estados Unidos (Goldstone, California) y Australia (Canberra). Estas estaciones constituyen la denominada *red de espacio profundo* de NASA (Deep Space Network, DSN) y garantizan la visibilidad permanente de cada uno de los satélites desde al menos una de ellas (*ver fig. 1*). Las antenas se van turnando en la tarea de seguimiento de los satélites, de manera similar a los corredores de un equipo que se van pasando el relevo mientras dura la carrera, y proporcionan la información esencial para conducir la nave a su destino.



Figura 1: *Izquierda:* Distribución geográfica de las estaciones de seguimiento de satélites de la NASA (Agencia Espacial Norteamericana). *Derecha:* Antena de seguimiento de la ESA (Agencia Espacial Europea).

Trayectorias de las naves, ó las carreteras en el espacio

Durante los viajes espaciales casi nunca se avanza en línea recta. Las trayectorias de vuelo se planean para minimizar la demanda de consumo energético, con el fin de prolongar el tiempo de vida y el retorno científico de la misión.

Las órbitas de transferencia de Hohmann, así denominadas en honor al ingeniero alemán Wolfgang Hohmann que las presentó por primera vez en 1925, son la opción energéticamente más favorable para llevar a una nave desde la Tierra a otro planeta cercano, como Venus ó Marte. Son órbitas elípticas cuyo perihelio (punto más cercano al Sol) está en la órbita de la Tierra y su afelio (punto más distante del Sol) en la de Marte; o viceversa en el caso de Venus. Para insertar una nave en una de estas órbitas se necesita “ajustar” la velocidad orbital de la nave aumentando (o disminuyendo) sólo su componente tangencial. Esto se realiza con la asistencia de cohetes en el momento del lanzamiento.

Si el objetivo de la misión es llegar al planeta, y no sólo a su órbita, deberá ocurrir que la llegada de la nave a la órbita del planeta coincida con la llegada del planeta a la misma ubicación. Para calcular la posición propicia del planeta relativa a la Tierra en el momento del lanzamiento se utilizan las leyes de Kepler, propuestas por el astrónomo alemán Johannes Kepler en el siglo XVII para describir el movimiento de los planetas en el sistema solar. Además, para que la nave se coloque en órbita alrededor de Marte (es decir, sea capturada por Marte) necesitará disminuir su velocidad con respecto al planeta, bien encendiendo los motores de frenado o por otro medio; el frenado deberá ser aún mayor si lo que se pretende es descender hasta su superficie, para conseguir que el punto más bajo de la nueva órbita coincida con la superficie del planeta.

Los cohetes proporcionan los cambios en la velocidad necesarios para

inyectar una nave espacial dentro de las órbitas de transferencia, o para saltar entre órbitas. Por ejemplo, para ir a Marte, se necesita aumentar en algo menos de 3 kilómetros por segundo la velocidad de la nave, con respecto a la velocidad orbital de la Tierra. Sin embargo, para llegar a planetas más lejanos se necesita una velocidad adicional para vencer la atracción gravitatoria del Sol. La gran potencia del cohete necesario para suministrarla supone un serio inconveniente en el uso de estas órbitas para alcanzar los planetas distantes. Afortunadamente, existen otras maniobras alternativas que proporcionan el impulso de velocidad necesario sin necesidad de consumir combustible.

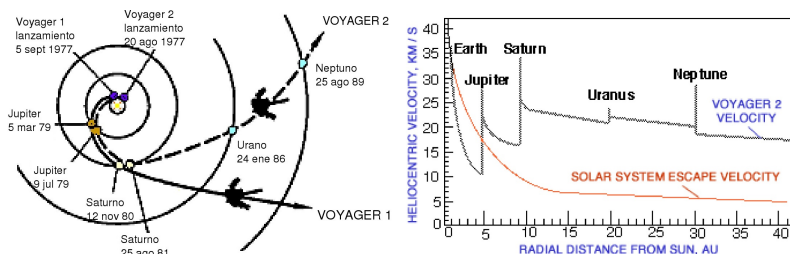


Figura 2: *Izquierda:* Vuelo interplanetario de las misiones *Voyager 1* y *2*, donde aparecen indicadas las maniobras de asistencia gravitatoria realizadas para llegar a sus destinos. *Derecha:* Gráfico con las variaciones de la velocidad de la nave durante su vuelo interplanetario. Los picos indican los impulsos de velocidad resultado de los encuentros con cada uno de los planetas.

Una maniobra muy útil en vuelos interplanetarios es la denominada maniobra de impulso gravitatorio, ó de asistencia gravitatoria, ó con el término inglés “fly-by”. En ella se aprovecha el paso de la nave por las inmediaciones de un planeta en movimiento para transferir parte de la energía cinética del planeta a la nave, aumentando así su velocidad a la vez que se cambia su rumbo sin necesidad de consumir combustible. La primera vez que se puso en práctica fué durante el vuelo del *Mariner 10*, lanzado en 1973 hacia Venus, y que usó la gravedad del planeta para prolongar su órbita hacia Mercurio. Desde entonces supone una parte esencial del protocolo de navegación. También, las aproximaciones de los *Voyager* a cada uno de los planetas sirvieron, además de para su exploración, para hacer posible el “gran tour” hasta Neptuno, en el borde exterior del sistema solar. El encuentro con Júpiter abasteció al *Voyager 2* con la velocidad necesaria para alcanzar Saturno; su encuentro con Saturno hizo posible su siguiente trecho de viaje hacia Urano, y así sucesivamente. Los planetas en movimiento suministraron la energía (ver fig. 2). Finalmente, también se han usado encuentros con la Tierra con

el mismo fin. Por ejemplo la sonda *Galileo*, en su camino hacia Júpiter, fué primero a Venus y luego retornó a la Tierra para ganar impulso y tomar rumbo definitivo a Júpiter. Todo esto recuerda a un juego de billar cósmico, donde además el satélite transporta un pequeño cohete que le permite corregir su curso cuando lo necesita y así hace posible jugadas complejas.

Una de las fases más críticas de las misiones espaciales es la de aproximación planetaria. El nivel de precisión requerido para realizar maniobras de asistencia gravitatoria, ó para la inserción en órbita alrededor del planeta, ó en una órbita de impacto para lanzar una sonda hasta un determinado punto de la superficie, aumenta con la complejidad de los objetivos de las modernas misiones espaciales, que en algunos casos parecen más cercanas ¡al guión de una película de ciencia ficción que a la realidad!. La incorporación de la técnica interferométrica de muy larga base (VLBI) a las técnicas tradicionales de telemetría ha supuesto una revolución en la navegación espacial: proporciona alta resolución en un sistema de referencia cuasi inercial.

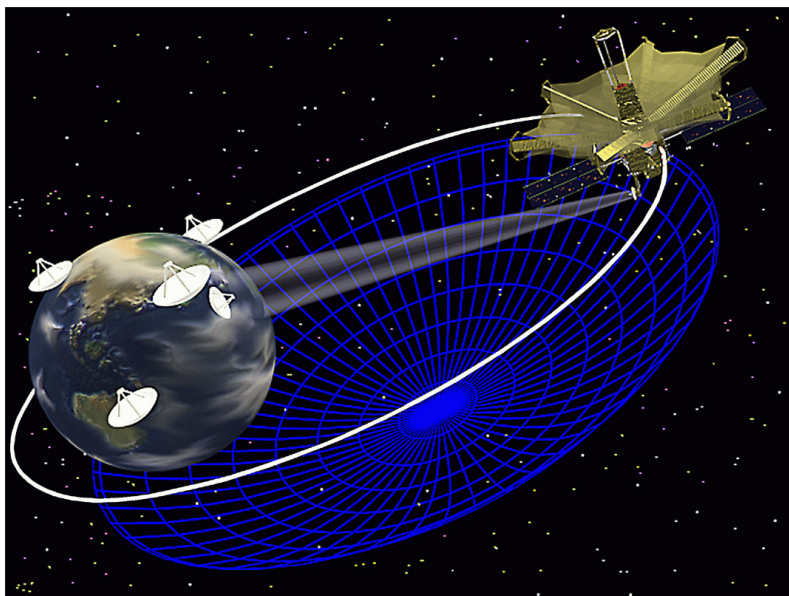


Figura 3: Impresión artística del radiotelescopio gigante con resolución equivalente a la que se obtiene con observaciones conjuntas entre antenas en la Tierra y la antena en órbita, HALCA, con la técnica de VLBI. (Cortesía de ISAS, Japón.)

VLBI: una técnica multidisciplinaria y ultra precisa

VLBI (Very Long Baseline Interferometry) es una técnica interferométrica que conecta múltiples antenas, separadas por grandes distancias entre sí, para actuar como un único gran radiotelescopio, y proporciona muchas de las ventajas de tener una antena parabólica gigante tan grande como la distancia que separa los telescopios. Entre ellas, un elevadísimo poder de resolución (Rogers et al., 1983). Este término hace referencia a la separación mínima angular entre dos objetos para apreciarse como separados, la cual es inversamente proporcional a la apertura del instrumento (y a la frecuencia a la que se realizan las observaciones). La resolución es algo así como la “agudeza visual”, ó la precisión angular del instrumento. Las antenas que participan en VLBI están separadas por grandes distancias que pueden llegar a superar el tamaño de la Tierra (*ver fig. 3*); en 1997, el grupo liderado por el Prof. Hirabayashi del Instituto Astronáutico y de Ciencias del Espacio (ISAS) de Japón puso en órbita una antena de 8 metros de diámetro (VSOP/HALCA, VLBI Space Observatory Program), para participar en las observaciones de VLBI. La órbita seguida por HALCA se determinó con una precisión entre 2 y 5 metros (Porcas y Rioja, 2000).

La técnica de VLBI supone la recepción simultánea de radioseñales o frentes de onda procedentes de un objeto en el cielo en cada una de las antenas participantes, donde cada una de ellas funciona de forma independiente usando un reloj atómico de alta precisión para controlar el tiempo y la frecuencia. Posteriormente, las señales recibidas en cada antena se envían a un centro de correlación de datos de VLBI donde se procesan de forma conjunta: la diferencia en el tiempo de llegada de los frentes de ondas a cada par de antenas se determina con altísima precisión, de unos pocos picosegundos (1 picosegundo = 1 billonésima de segundo = 10^{-12} segundos). El análisis de los datos correlacionados arroja precisiones sin precedente en la medida de posiciones, del orden del milímetro en la Tierra, y de decenas de microsegundos de arco (1 microsegundo de arco = 10^{-6} segundos de arco) en el cielo. Esto es equivalente a la resolución de un telescopio que desde la Tierra nos permitiera ver nítidamente todos los rasgos de la cara de un astronauta en la Luna. En cambio, los mejores radiotelescopios individualmente consiguen imágenes con una resolución de unos pocos segundos de arco.

Los comienzos del VLBI están ligados a la radioastronomía, donde destaca por proporcionar imágenes de la más alta resolución, y las medidas más precisas de distancias, posiciones y velocidades, en objetos situados a distancias cósmicas. Sin embargo, su aplicación en otros campos ha proporcionado resultados extremadamente importantes que la han convertido en una técnica multidisciplinaria. Destaca en su contribución en geodesia, geofísica, al establecimiento de sistemas de referencia, creación de redes dedicadas a monitorizar las deformaciones en zonas geológicamente ac-

tivas, terremotos, fallas, ..., (ver fig. 4) y más recientemente estudios de climatología, planetología y navegación interplanetaria.

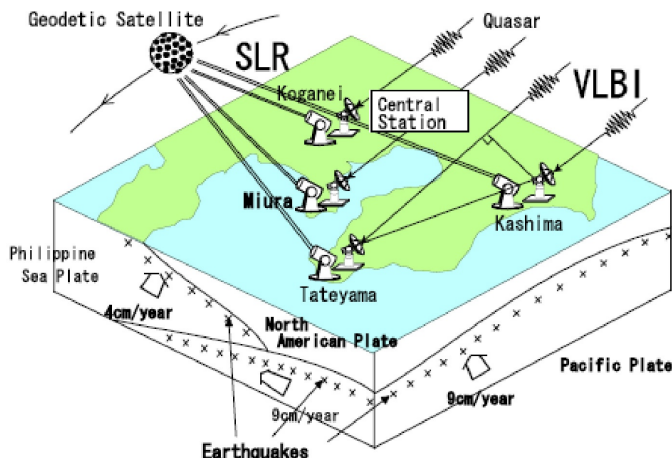


Figura 4: Proyecto *Keystone* (1996-2002) para monitorizar movimientos de tierra en el área metropolitana de Tokio (Japón) usando tres técnicas, VLBI, SLR y GPS, para la prevención de catástrofes naturales en esta zona de elevado riesgo, por la confluencia de tres placas tectónicas (Norteamericana, Pacífico y Filipina) y la alta densidad de población. La componente de VLBI la constituyen 4 antenas conectadas con el centro de procesamiento por fibra óptica, lo que permite la correlación en tiempo real (e-VLBI). Todo el proceso está automatizado y las estimaciones de los parámetros geodésicos están disponibles en tan sólo ¡30 minutos después de las observaciones! Desarrollado por “Communications Research Laboratory” (CRL, Kashima, Japón).

La aplicación de VLBI al campo de la geodesia, desde mediados de los años 70, ha producido resultados científicos muy interesantes relacionados con la estructura, actividad y orientación de la Tierra, utilizando observaciones astronómicas. Ha proporcionado la primera medida directa del movimiento relativo de las placas tectónicas, con el programa *Crustal Dynamics Project* (CDP), liderado por el grupo del Centro de Vuelos Espaciales de Goddard (GSFC) de NASA, y validado los modelos teóricos basados en datos geofísicos (Ryan y Ma, 1998, y otras referencias en su artículo). Se han medido movimientos seculares de hasta 63.5 ± 0.8 milímetros por año, entre antenas separadas 5700 kilómetros, situadas en Hawaii y Japón, que se asocia al movimiento relativo de la placa del Pacífico con respecto a Japón. También se han medido movimientos discontinuos (ver fig. 5) asociados con actividad volcánica y terremotos.

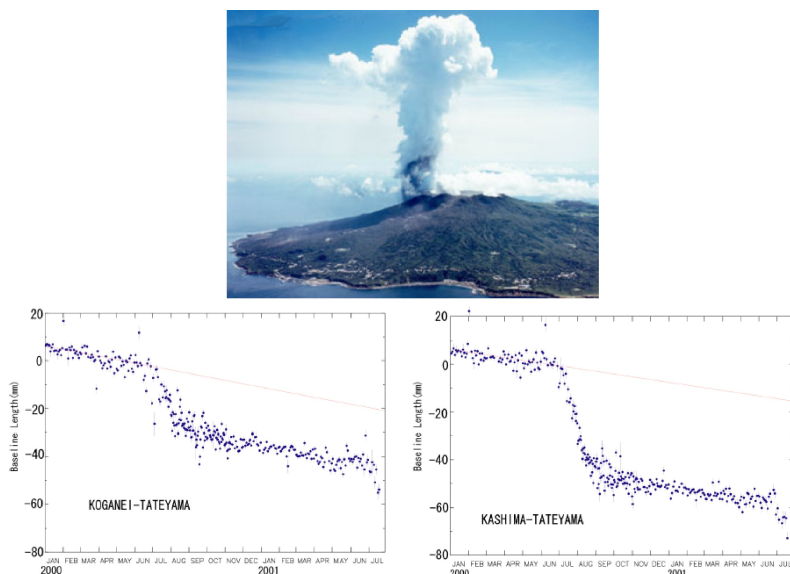


Figura 5: *Arriba*: Imagen de la erupción del volcán en la isla Miyake, situada en el archipiélago Izu (Japón) tomada el 10 de Agosto de 2000. (Cortesía de Asia Air Survey Co., Ltd.) *Abajo*: Evolución temporal de la distancia entre dos pares de antenas que participan en el proyecto *Keystone*, medida con VLBI. La tendencia secular se ve claramente alterada por la erupción volcánica en la isla Miyake, del archipiélago Izu. *Créditos*: Gráfico obtenido de una publicación de Taizoh Yoshino y colaboradores, del Communications Research Laboratory, Japón.

En la actualidad, VLBI es una técnica fundamental en geodesia que colabora en la definición y mantenimiento de un sistema de referencia terrestre (ITRF, International Terrestrial Reference Frame) materializado por un conjunto de más de 200 antenas en la Tierra, cuyas posiciones y velocidades se conocen con altísima precisión, del orden del milímetro y del milímetro por año, respectivamente.

Es además la única técnica geodésica espacial utilizada para la definición y mantenimiento del sistema de referencia inercial celeste (ICRF, International Celestial Reference Frame), materializado por las posiciones de unos 300 objetos en el espacio, los cuásares, cuyas coordenadas se conocen con precisiones de unas pocas centenas de micro segundos de arco.

También es única en su capacidad de medir simultáneamente todos los parámetros que caracterizan la orientación de la Tierra en un marco de referencia inercial, una información indispensable para la navegación

espacial. A modo de ejemplo, VLBI puede detectar cambios en la longitud del día, debidos a irregularidades en la rotación diurna, de hasta unos pocos microsegundos.

Los cambios en la orientación de la Tierra responden al efecto integrado del intercambio de momento angular entre la tierra sólida, la atmósfera, los océanos y el núcleo fluido, así como a cambios en la forma de la Tierra debido a cargas glaciares, oceánicas y atmosféricas. Las observaciones ultra precisas con VLBI proporcionan una importante base de datos para estudiar los modelos de los distintos componentes de la Tierra propuestos por los geofísicos. Quizás una de las aplicaciones más sorprendentes sea al estudio del interior de la Tierra; en este campo las observaciones con VLBI han revelado la existencia de un núcleo con una forma más elíptica de lo que se pensaba.

Por supuesto, la extremada precisión alcanzable con las técnicas de VLBI no ha pasado inadvertida entre la comunidad astronáutica. Los objetivos de las nuevas misiones espaciales requieren una gran precisión en los sistemas de control para la navegación interplanetaria. Por ello VLBI, en su configuración Δ DOR, se ha incorporado al protocolo para la navegación espacial interplanetaria.

Misiones

En esta sección se hace referencia explícitamente a 5 misiones espaciales que están íntimamente relacionadas con la aplicación de técnicas ultra precisas (VLBI) para la navegación espacial; podemos decir que representan el “estado del arte” de las técnicas de navegación espacial.

Mars Express (MEX)

La Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó su primera misión a Marte, el *Mars Express* (MEX), el 2 Junio de 2003, desde el cosmódromo de Kazajastán. La nave llegó a su destino el 25 de Diciembre de 2003 y desde entonces permanece en órbita exploratoria alrededor del planeta. Durante este tiempo los instrumentos a bordo de la nave han realizando experimentos que han permitido ampliar nuestro conocimiento sobre la atmósfera de Marte, proporcionando mapas globales de alta resolución de la composición atmosférica y de su circulación global. Merecen especial mención las imágenes en color de la superficie de Marte tomadas con su cámara de alta resolución (HRSC, High Resolution Stereo Camera). Dicha cámara, además, permite captar imágenes en varias direcciones a la vez que dan lugar a espectaculares perspectivas en 3 dimensiones (*ver fig. 6*). Otro de los instrumentos a bordo de la MEX es un radar para el sondeo del subsuelo y la ionosfera (MARSIS, Mars Advanced Radar for Subsurface

and Ionosphere Sounding). Uno de los principales objetivos de este radar es buscar agua, en forma líquida ó helada, en el subsuelo marciano. La vida de la misión ha sido recientemente prolongada por dos años más, hasta finales de 2007, para dar tiempo a completar los proyectos de exploración.

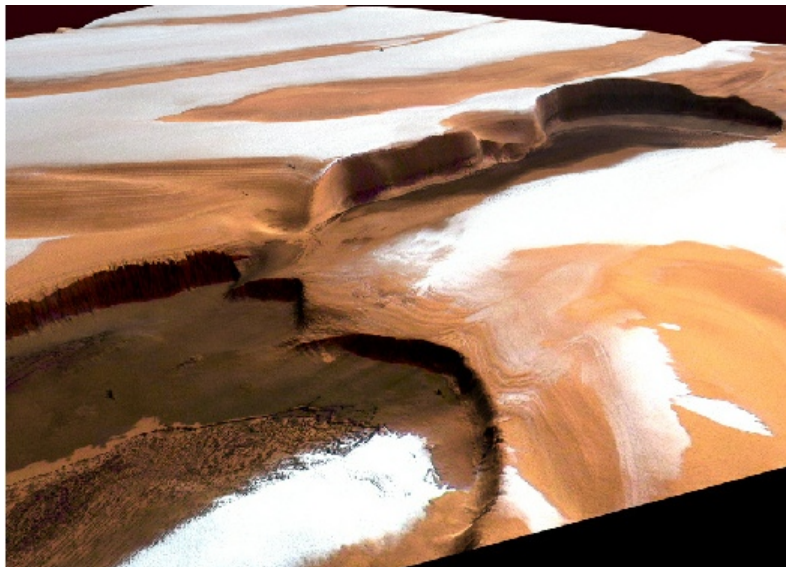


Figura 6: Perspectiva del casquete de hielo en el polo Norte de Marte captada por la cámara de alta resolución a bordo de la nave *Mars Express* (MEX). Se aprecian acantilados de unos 2 kilómetros de altura. El material oscuro en la parte más baja podrían ser cenizas volcánicas (Cortesía de ESA/DLR/FU Berlín (G.Neukum)).

La misión transportaba una sonda con un robot, el *Beagle 2*, para la exploración “in-situ” de la superficie marciana, al cual se le perdió la pista antes de llegar a su destino. Existen especulaciones sobre el destino final del *Beagle 2*, entre otras la posibilidad de que quedara atrapado dentro de un cráter, pero lo cierto es que no se tiene ninguna evidencia observacional más allá del momento en que la sonda se separó de la nave principal. En la Tierra, la esperada señal que emitiría el robot al llegar a la superficie, planeada para el 24 de Diciembre de 2003, no se llegó a detectar.

La pérdida de la sonda no ha empañado el éxito de la misión, que también desde un punto de vista técnico ha supuesto un gran logro por superar los desafíos de navegación necesarios para realizar las complicadas maniobras.

En total, durante la fase de navegación interplanetaria, se llevaron a cabo 55 observaciones de 90 minutos de duración con la técnica Δ DOR, cada 3 ó 4 días, utilizando las antenas del DSN (con observaciones simultáneas entre las antenas en Goldstone y Canberra, y entre Goldstone y Madrid).

La fase de aproximación a Marte fué sin duda una de las mas críticas de la misión. Durante las semanas anteriores al encuentro se intensificó la campaña de observaciones, hasta dos observaciones por día, y se redujo el tiempo empleado en el procesamiento de las observaciones Δ DOR hasta 12 horas. En esta fase se efectuaron complicadas maniobras para dirigir la nave al punto idóneo desde donde soltar la sonda *Beagle 2*, y acto seguido redirigirse desde la trayectoria de impacto hasta una que permitiría a la nave principal entrar en órbita alrededor de Marte. La precisión en la determinación de la órbita fué crucial para predecir la trayectoria de la nave, y el diseño de las maniobras. La precisión en las medidas de las posiciones de la nave superó las expectativas, resultando ser mejores que 0,1 nanosegundos, que corresponde a un error de algo más de medio kilómetro a la distancia a la que se encuentra Marte (Dongsuk Han et al., 2004).

MER

En las mismas fechas que la ESA enviaba su misión MEX a Marte, la NASA preparaba el lanzamiento de su misión *Mars Exploration Rover* (MER) para la exploración del planeta rojo mediante 2 robots móviles, el *Spirit* y el *Opportunity*, depositados en su superficie (ver fig. 7). El objetivo de la MER era la exploración geológica de la superficie marciana en busca de evidencias que aporten respuestas a la cuestión abierta sobre la existencia de agua en Marte, y para determinar si se dan las condiciones favorables para preservar pruebas de cualquier tipo de posible vida en el pasado. Los robots se controlan desde Tierra directamente, mediante el envío y recepción de comandos a través de las antenas del DSN, ó utilizando como intermediarios otras naves de NASA, el *2001 Mars Odyssey* y el *Mars Global Surveyor*, que se encuentran orbitando alrededor de Marte. A día de hoy, ambos robots han superado las expectativas de supervivencia y descubrimientos en Marte, y continúan en buen estado (página web de la misión MER).

La misión MER tiene también gran interés desde el punto de vista de la comparación de técnicas de navegación espacial de alta precisión. Durante el vuelo interplanetario se han utilizado las dos técnicas de navegación relacionadas con VLBI: en su configuración Δ DOR, tradicionalmente usada por NASA; y usando las técnicas de referencia de fase tradicionalmente usadas en radioastronomía, realizado por el grupo compuesto por el Dr. Lanyi y sus colaboradores. Las observaciones con Δ DOR se llevaron a cabo con la red de antenas de espacio profundo (DSN) de NASA; las obser-

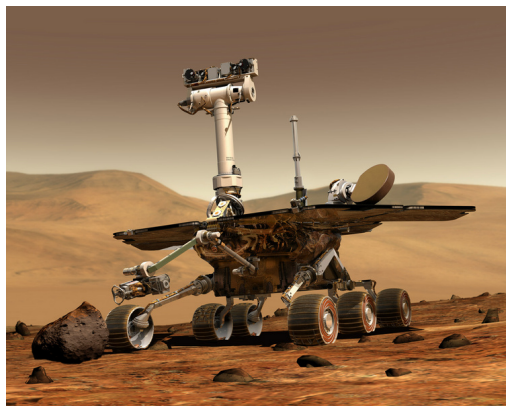


Figura 7: Impresión artística de uno de los dos robots transportados por la misión *Mars Exploration Rover* (MER) para la exploración “in-situ” de la superficie de Marte (cortesía de NASA).

vaciones de referencia de fase con la red de antenas de VLBI del NRAO (VLBA, Very Long Baseline Array). Ambas herramientas de navegación espacial están íntimamente relacionadas con la técnica de VLBI, aunque difieren en la estrategia observacional, y en los observables utilizados en el análisis. Ambas miden la posición relativa de la nave con respecto a un sistema inercial predeterminado en el espacio, ó dicho de otro modo, proporcionan una navegación utilizando como referencia las posiciones de las “estrellas” fijas (o mejor, de los “cuásares”).

El estudio comparativo presentado por el Dr. Lanyi y colaboradores (Lanyi et al., 2005) concluye que las precisiones proporcionadas utilizando la configuración “astronómica” de referencia de fase superan a las de Δ DOR, en las observaciones a las frecuencias utilizadas hoy en día para la comunicación con satélites (banda X, a 8,4 GHz). En este caso, el error formal en las posiciones estimadas a partir del análisis de las observaciones con las antenas del VLBA es la mitad del correspondiente a las observaciones con la DSN. También concluyen que se espera que ambas técnicas proporcionen precisiones equivalentes usando observaciones a frecuencias más altas, por ejemplo a 32 GHz (banda Ka), a las que migrarán las comunicaciones con satélites en un futuro próximo.

Nozomi

Nozomi (=“esperanza”, en japonés) fué la primera sonda desarrollada y enviada por la Agencia Espacial Japonesa (ISAS) a Marte, el 4 de Julio de 1998. Su objetivo científico era estudiar el efecto del viento solar en la

atmósfera de Marte y también desarrollar nuevas tecnologías para futuras misiones al planeta.

Su llegada al planeta rojo sufrió un importante retraso debido a un problema en la propulsión. A raíz de un excesivo consumo de combustible durante una maniobra en su primer giro alrededor de la Tierra, los expertos en navegación decidieron realizar una laboriosa reestructuración del plan de vuelo. Se optó por colocar la nave en una órbita heliocéntrica a la espera de poder realizar un par de maniobras de asistencia gravitatoria alrededor de nuestro planeta, que le transfirieran el suficiente impulso de velocidad para tomar rumbo definitivo hacia Marte. Finalmente llegó a su destino en Enero de 2004.

La relevancia de esta misión, relativa al contenido de este artículo, reside en su contribución al desarrollo de la aplicación de la técnica de VLBI en su configuración “astronómica” para la navegación espacial, en tiempo real. Durante su trayectoria se llevaron a cabo más de 30 observaciones con VLBI de las misiones *Nozomi* y *Hayabusa* (ver más adelante), entre Septiembre de 2002 y Noviembre de 2003, usando mayormente una red de 9 antenas esparcidas por territorio japonés (Ichikawa et al. 2003, Sekido et al. 2003). Los resultados fueron validados por comparación con medidas telemétricas.

Japón cuenta con una larga historia en las aplicaciones de VLBI a la navegación espacial. El Dr. Asaki y colaboradores (Asaki et al., 1998) realizaron el primer intento satisfactorio de determinación ultra precisa de la posición de un satélite utilizando VLBI en su configuración “astronómica”, es decir, con observaciones alternadas del satélite y de cuásares cercanos, y explotando al máximo el potencial de VLBI. Aunque hubo grupos anteriores que utilizaron esta configuración con éxito, en las dos misiones soviéticas *Vega* (Mc.Elraith et al., 1988) y *Phobos* (Hildebrand et al. 1994), el grupo del Dr. Asaki es el primero que utilizó el observable fase interferométrica, el más preciso de los observables de VLBI, en el análisis.

Japón lidera asimismo el desarrollo tecnológico para la realización de observaciones de VLBI en “tiempo real”, utilizando fibra óptica que permite la transmisión de datos a alta velocidad desde cada antena hasta el centro de procesamiento de datos de VLBI en Kashima, cerca de Tokio (Japón). Esto permite obtener estimaciones de las posiciones en un tiempo récord, de vital importancia para la aplicación de esta técnica a la navegación espacial.

Hayabusa

... o la misión “halcón” japonesa, que mantiene en vilo a los miembros del equipo de navegación mientras se confecciona este artículo, ocupados en la ejecución de complicadas maniobras de aproximación de la nave a un

asteroide para su exploración, incluidos el descenso de robots y toma de muestras de material ¡para su posterior retorno a la Tierra!.

Los asteroides están compuestos por material sin procesar, que ha dado lugar a los planetas. Por eso su estudio puede ayudar a resolver muchos misterios sobre la génesis del sistema solar. Son, por decirlo de alguna manera, cápsulas que han escapado al paso del tiempo y a partir de su estudio se puede recrear el pasado.



Figura 8: Imagen del asteroide *Itokawa* tomada desde la cámara a bordo de la nave *Hayabusa*, en órbita alrededor del asteroide (cortesía de ISAS/JAXA).

El 9 de Mayo de 2003 la Agencia Espacial Japonesa (JAXA, que engloba a la antigua ISAS) lanzó al espacio una nave para explorar asteroides, y desarrollar la tecnología que permita recoger muestras y traerlas de vuelta a la Tierra, por primera vez en la historia. Cuenta con una serie de instrumentos a bordo, cámaras para obtener imágenes del asteroide, altímetros láser para medir el relieve y espectrómetros para analizar la composición de sus minerales. Esta misión tiene muchos aspectos innovadores, entre ellos el retorno de muestras del suelo y rocas del asteroide para estudiar en laboratorios ubicados en la Tierra; también, la utilización de un novedoso sistema de propulsión a base de un motor de iones de gas xenon.

El 12 de Septiembre de 2005 *Hayabusa* llegó a su destino, el asteroide 25143 *Itokawa* (que toma su nombre del padre del programa espacial japonés, el Dr. Hideo Itokawa), que se encuentra a 320 millones de kilómetros de la Tierra. El plan de la misión se está desarrollando según lo previsto, con alguna que otra variación. La nave, tras llegar a su destino, ha permanecido en órbita alrededor del asteroide para obtener fotos de su superficie, desde unos 7 kilómetros de distancia. Sus primeras imágenes

muestran que el asteroide mide unos 600 metros de longitud y tiene forma muy elongada (ver *fig. 8*). La misión transporta dos robots equipados con cámaras que, una vez soltados, se desplazarán por el asteroide durante varios días para enviar imágenes del paisaje.

Finalmente, la nave se acercará y se posará en la superficie para recoger muestras. En Diciembre de 2005 la nave abandonará el asteroide *Itokawa* y emprenderá su regreso a la Tierra, donde se espera que llegue en Junio de 2007 (ver la página web de la misión Hayabusa).

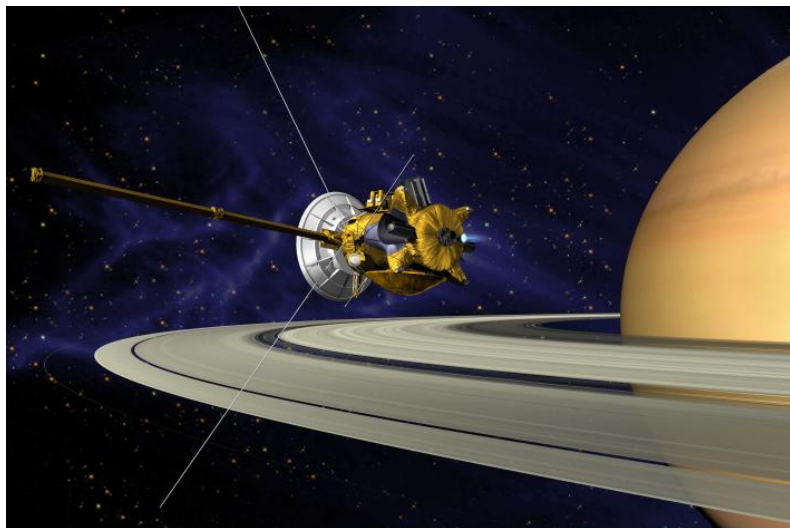


Figura 9: Impresión artística de la misión *Cassini-Huygens* en el momento de su llegada al sistema de Saturno (cortesía de NASA-ESA). La sonda *Huygens* viajó a lomos de la *Cassini* durante los casi 7 años de travesía interplanetaria. Es el instrumento con forma de cono que se aprecia en la imagen. Finalmente se separó de la nave principal para iniciar un descenso atravesando la densa atmósfera de Titán hasta su superficie.

Cassini-Huygens

Sin duda, uno de los logros del año en el campo de VLBI ha sido la contribución de esta técnica a la misión planetaria *Cassini-Huygens*. Las precisiones alcanzadas en la determinación de posiciones y de trayectorias han sido realmente espectaculares. Se puede decir que ha entrado en el libro de records de VLBI por ser el aterrizaje efectuado a mayor distancia, por control remoto, desde la Tierra; y por la extensa presencia institucional, con

la participación de 12 organizaciones pertenecientes a 7 países diferentes. Este puesto seguirá vigente durante varios años más ya que no hay planeada ninguna misión espacial para el futuro que pueda equiparar estos logros.

En Julio del año pasado la nave *Cassini* entró en órbita alrededor de Saturno después de una travesía interplanetaria de casi 7 años y 3.500 millones de kilómetros recorridos (ver fig. 9). La nave empezó a enviar imágenes de alta calidad del planeta y sus anillos y de sus más de 30 lunas; éste era el principio de una misión científica de reconocimiento del planeta Saturno y sus lunas que durará cuatro años. Esta misión está capacitada para llevar a cabo una exploración mucho más completa que sus predecesores, puesto que está equipada con un sofisticado laboratorio de instrumentos científicos. Entre ellos, la sonda *Huygens*, una especie de cono de tres metros de diámetro, cuya misión es sumergirse en la densa y desconocida atmósfera de Titán, la luna más grande de Saturno. El plan de la misión era que *Cassini* la colocara en una trayectoria de impacto, a partir de donde comenzaría un descenso de dos horas y media hacia la superficie, con la ayuda de un paracaídas; su objetivo: llevar a cabo experimentos durante su descenso, además de realizar medidas de la temperatura, presión, densidad y balance de energía en la atmósfera, y de tomar fotografías de las nubes y de la superficie. El retorno de datos de *Huygens* a la Tierra se organizó, durante la planificación de la misión, en dos fases: en primer lugar toda la información se transmitiría al cercano orbitador *Cassini*, y en una segunda fase desde *Cassini* a la Tierra, usando su antena principal de 4 metros de diámetro, al final de la misión.

Entre los experimentos a realizar por *Huygens* figura uno relacionado con el contenido de este artículo, el *Doppler Wind Experiment* (DWE), cuyo investigador principal es el Dr. Michael Bird (Universidad de Bonn, Alemania). El objetivo científico del DWE es obtener medidas precisas del perfil de los vientos a diferentes alturas en la atmósfera de Titán, mediante medidas Doppler de la señal de *Huygens* a lo largo de su trayectoria de descenso – estabilizada con la ayuda de alas aerodinámicas que generan un giro controlado a baja velocidad. Los vientos en la atmósfera afectarán la velocidad horizontal durante el descenso dando lugar a cambios en la frecuencia de la señal recibida por *Cassini*, procedente del oscilador ultraestable a bordo de *Huygens*. A partir de estas medidas Doppler se pueden estimar las variaciones de la velocidad del viento con la altura en Titán; más concretamente, de la componente de la velocidad en la dirección *Huygens-Cassini*.

La nave *Cassini* emprendió el largo viaje hacia Saturno el 15 de Octubre de 1997 desde la estación de lanzamiento de cohetes en Cabo Cañaveral (Florida, Estados Unidos) y es el resultado de una colaboración entre tres agencias espaciales, americana, europea e italiana, NASA, ESA y ASI, respectivamente. Durante la fase de crucero se ha acercado a Venus y a la Tierra, en 1998, y posteriormente también a Júpiter, con el fin de realizar

maniobras de asistencia gravitatoria y adquirir la velocidad suficiente para poner rumbo a Saturno. Durante los 6 meses que *Cassini* estuvo en las cercanías de Júpiter coincidió con otro satélite de la NASA, el *Galileo*, en órbita desde 1995 hasta 2003, lo que proporcionó la oportunidad poco frecuente de estudiar este planeta desde 2 perspectivas diferentes al mismo tiempo. Este encuentro enriqueció los estudios de la influencia del viento solar en la magnetosfera, sus lunas, anillos y nubes.

El 25 de Diciembre de 2004, la sonda europea *Huygens* se separó de la nave principal y emprendió su camino en solitario. Tres semanas más tarde, el 14 de Enero de 2005, comenzaría su descenso hacia la superficie de Titán, convirtiéndose en el primer caso de “alunizaje” en la luna de otro planeta. Este apasionante acontecimiento, sin precedentes en la historia de la astronáutica, fué seguido por numerosos miembros de la comunidad científica y de los medios de comunicación, que se desplazaron hasta alguno de los centros de seguimiento de naves espaciales para seguir en directo el desarrollo de los acontecimientos. Durante las dos horas y media que duró el descenso hubo momentos de euforia, alternados con momentos de gran consternación y de esperanza.

La monitorización de la fase de descenso de *Huygens* (ver la figura que encabeza el artículo) contó con el apoyo de las observaciones, desde Tierra, con un arsenal de antenas situadas en Estados Unidos, Australia, Japón, China y Europa. Un total de 20 antenas para complementar la estrategia de retorno de datos de *Huygens*, inicialmente planeada únicamente a través de la antena principal de *Cassini*. Es digno de recalcar que estas antenas observaron la débil señal enviada por *Huygens* a *Cassini* (¿desde una distancia de 1.200 millones de kilómetros!).

Las observaciones terrestres tenían dos objetivos: por una parte conocer en “casi” tiempo real si la misión estaba operacional y transmitiendo (con apenas 67 minutos de retraso introducidos por la propagación, frente a las 4 o 5 horas de retraso contempladas inicialmente); por otra, aportar medidas de la componente de velocidad en la dirección *Huygens*-Tierra para el experimento DWE, para complementar las medidas de la única componente, *Huygens-Cassini*, contempladas en la misión original.

Encabezando la lista de potentes antenas participantes en el programa estaba el Telescopio Robert C. Byrd en Green Bank (GBT) del NRAO, en Virginia del Oeste, Estados Unidos, y el Radiotelescopio Parkes del CSIRO, en Nueva Gales del Sur, Australia, con 110 y 64 metros de diámetro, respectivamente. Para las medidas Doppler durante esta oportunidad única se utilizó instrumentación especialmente diseñada para la detección de señales débiles. La detección inicial, llevada a cabo con los “Receptores de RadioCiencia” ultrasensibles del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL, California) proporcionó la primera prueba inequívoca de que *Huygens* había sobrevivido a la fase de entrada y había comenzado su transmisión de radio señales hacia *Cassini*. Esta sofisticada instrumentación permitió

monitorizar en “casi” tiempo real los momentos principales de la misión, cuándo se abrió el primer paracaídas, el cambio de paracaídas tras unos 15 minutos de vuelo atmosférico, y determinar el momento del impacto en Titán, después de 2 horas y media de descenso a una velocidad de unos 5 metros por segundo. Estos eventos dejaron su impronta característica, claramente identificable, en las medidas Doppler de la débil señal. También permitieron seguir en contacto con la sonda horas después del aterrizaje, proporcionando datos para medidas precisas del movimiento de Titán, y para la calibración de las medidas tomadas durante el descenso.

Otro equipo liderado por el Dr. Leonid Gurvits, científico del Instituto Conjunto Europeo para VLBI (JIVE), en Holanda, coordinaron las observaciones de VLBI con una red de 16 radiotelescopios, que grabaron la señal de *Huygens* y la de un cuásar cercano en el cielo, en configuración “astronómica”; el objetivo siendo la determinación precisa de su trayectoria de descenso, usando técnicas de referencia de fase durante el análisis. Las antenas participantes, esparcidas por toda la superficie terrestre, en Norteamérica (red VLBA), Australia (antenas en Mopra, Ceduna, Hobart), China, Japón y Europa, se fueron incorporando a las observaciones a medida que el planeta se alzaba en sus horizontes. Para aumentar la sensibilidad se utilizaron las más altas velocidades de grabación utilizadas en la historia de esta técnica, de 1 Gigabit por segundo, en discos magnéticos de alta capacidad.

La gran expectación reinante durante las dos horas y media que pasaron entre la primera toma de contacto con *Huygens* y su llegada a la superficie de Titán se vió incrementada por la inesperada larga supervivencia de la sonda tras su alunizaje, que en ningún caso se esperaba que superase los 30 minutos. Sin embargo, aunque la señal enviada por la sonda seguía siendo recibida alta y clara en Tierra, Saturno se iba acercando al horizonte de la antena australiana de Parkes, lo que marcaba el fin de su visibilidad. Cuando parecía claro que *Huygens* seguiría transmitiendo durante más tiempo del que podría verse desde Hawaii, Australia y el este de Asia, se llevó a cabo una labor encomiable que culminó con la organización urgente de observaciones “ad hoc” con antenas en Europa: Westerbork (Holanda), Onsala (Suecia), Medicina (Italia) y Wettzell (Alemania), abandonaron sus ocupaciones, se dirigieron hacia Titán y sintonizaron sus receptores para recibir la señal de *Huygens*.

Para contribuir a la excitación del momento, poco después se tuvo conocimiento de un fallo en la configuración de uno de los receptores en *Cassini* que afectaba de forma fatal a la recogida de la señal ultraestable de *Huygens*. Esto impediría obtener las medidas Doppler entre la sonda y *Cassini*, lo que significaba el fracaso total del experimento DWE, y causó gran desánimo entre el grupo de científicos ansiosos de tener acceso a estos datos, después de una espera que se ha prolongado ¡durante décadas!.

En este ambiente de desolación, los científicos del DWE sabían que el

éxito de la componente VLBI del seguimiento sería lo único que podría dar una segunda oportunidad a la misión. No se ahorraron esfuerzos para agilizar el envío de los discos magnéticos grabados en cada una de las antenas al centro de procesamiento de datos de VLBI en Dwingeloo (Holanda), donde llegaron en cuestión de horas. Las buenas noticias no se hicieron esperar y llegaron poco después, en tiempo record, con la confirmación de la detección de franjas de interferencia, desde Dwingeloo (Holanda).

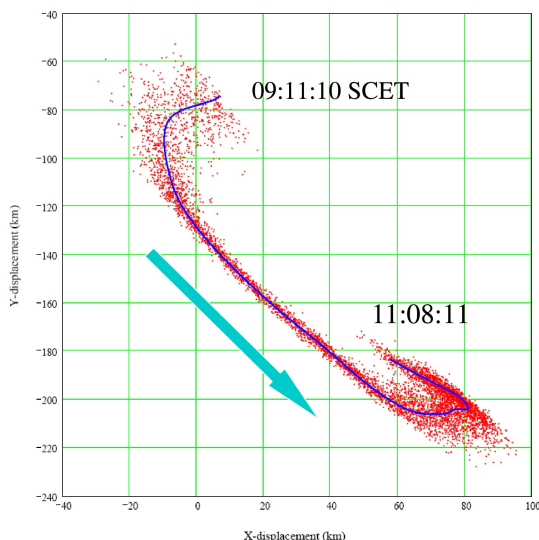


Figura 10: Impresión artística de la alta precisión obtenida con VLBI en la determinación de la trayectoria de la sonda *Huygens*, comparada con otras técnicas de navegación espacial. La alta resolución de VLBI permite determinar la trayectoria de impacto con una precisión mejor que 1 kilómetro, a una distancia de 1200 millones de kilómetros (figura cedida por el Dr. Leonid Gurvits).

El análisis de los datos de VLBI se está llevando a cabo utilizando un nuevo paquete de programas diseñado especialmente para este proyecto, cuyo objetivo es determinar la posición de la sonda con una precisión de 1 kilómetro en Titán, ¡a una distancia de 1.200 millones de kilómetros de la Tierra! (ver fig. 10). Esta resolución angular permitiría distinguir, desde Tierra, la pelota en un partido de ping-pong jugado en la Luna (cita literal del Dr. Leonid Gurvits).

Ya existen resultados preliminares (Bird et al., 2005) de las variaciones del viento con la altura en Titán a partir del análisis de los datos de VLBI

y de las medidas Doppler (*ver fig. 11*). Estos han permitido determinar que los vientos en Titán soplan en la dirección de la rotación de Titán (de Oeste a Este) a casi todas las alturas. La máxima velocidad encontrada, de unos 120 metros por segundo, fue medida minutos después del comienzo del descenso, a una altura de unos 120 kilómetros. Cerca de la superficie los vientos son flojos y se incrementan poco a poco con la altura hasta llegar a los 60 kilómetros, donde se observa un cambio del comportamiento y grandes variaciones en las medidas Doppler, un resultado inesperado y todavía sin explicación. También existen estimaciones de VLBI preliminares de la trayectoria bidimensional (proyección de la trayectoria en el plano del cielo), con una precisión de 1 kilómetro (*ver fig.12*). El estudio combinado de las medidas Doppler y las medidas de VLBI permitirá a los científicos reproducir la posición y trayectoria de la sonda, en 3 dimensiones, en su descenso hacia la superficie con altísima precisión.

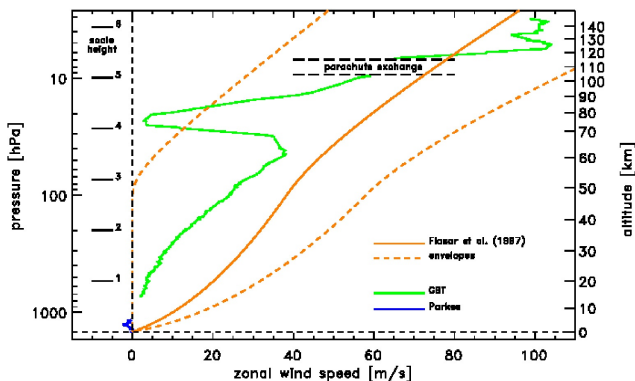


Figura 11: Resultados preliminares del perfil de los vientos a diferentes alturas en la atmósfera de Titán, obtenidas a partir de las observaciones con VLBI y las medidas “Doppler” (*verde*). También se muestran las predicciones de los modelos (*rojo*). La máxima velocidad se midió momentos después del comienzo del descenso, y se observa una disminución progresiva con la disminución de la altitud, a excepción de un comportamiento anómalo y todavía sin explicación a una altura de unos 60 kilómetros. (Figura cedida por el Dr. Leonid Gurvits. Material elaborado por el Dr. Bird y colaboradores para su publicación en *Nature*, 2005.)

Lo aprendido en Titán durante su descenso servirá a los planetólogos, además de para conocer este lejano y misterioso cuerpo, para ampliar los conocimientos sobre la atmósfera primitiva de nuestro propio planeta, ya que existen argumentos para pensar que Titán es una copia “helada” de la Tierra en sus comicios.

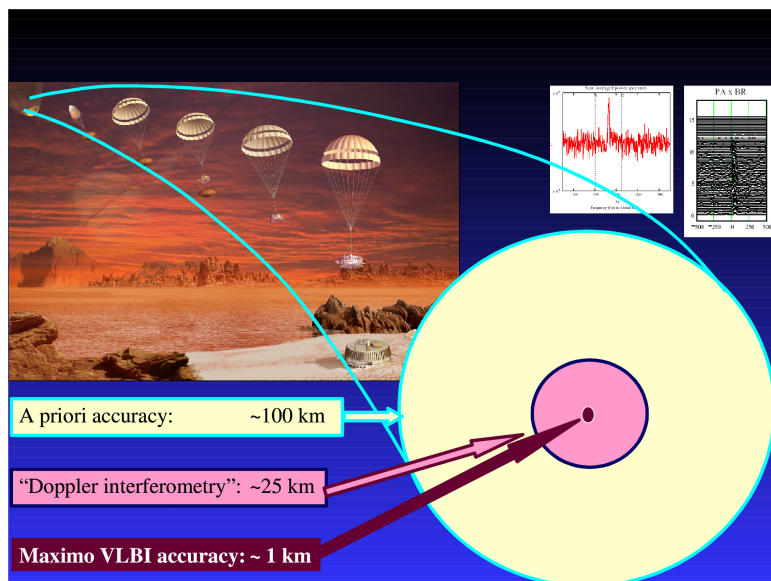


Figura 12: Reconstrucción de la trayectoria de descenso a través de la atmósfera de Titán seguida por la sonda *Huygens* a partir de medidas ultra precisas con la técnica VLBI. Los puntos representan las posiciones medidas y la línea su trayectoria. Son posiciones relativas a un cuásar, resultado del análisis con técnicas de referencia de fase que proporcionan las mayores precisiones alcanzables. *Nota:* Conversión entre unidades angulares y lineales a la distancia de Titán: 1 milisegundo de arco equivale a 6 kilómetros. (Figura cedida por el Dr. Leonid Gurvits. Material elaborado por el Dr. Bird y colaboradores para su publicación en *Nature*, 2005.)

Futuro ...

Sin lugar a duda, el desarrollo de nuevas tecnologías permitirán la exploración del espacio con más detalle todavía, mediante la obtención de imágenes de mayor resolución, descensos precisos a la superficie, movilidad en la superficie con mayor alcance, retorno de las misiones con información para su estudio en la Tierra, nuevos métodos más efectivos para ganar impulso, ejecución de maniobras más complejas, ó sistemas de navegación autónomos, entre otros. Todo ello orientado a poder navegar por el espacio tan cómodamente como nos desplazamos hoy en día por la Tierra con ayuda de un receptor GPS!.

En particular, en el campo de VLBI, se está dedicando un gran esfuerzo al desarrollo de nuevas tecnologías para permitir observaciones en tiempo real (e-VLBI), utilizando conexiones con fibras ópticas, y para la adquisición de datos a mayor velocidad. Una vez en funcionamiento la dotarán de un carácter más dinámico, al reducir el tiempo de espera entre las observaciones y los resultados, y crecerá su campo de “acción” para incluir objetivos más débiles. También, el futuro de VLBI está ligado a la integración con otras técnicas espaciales (SLR, GPS y Galileo, entre otras).

La misión *Cassini-Huygens* ha proporcionado un ejemplo de la sinergia entre técnicas experimentales desarrolladas para su uso en astronomía y basadas en radiofísica, electrónica y procesamiento de señales digitales, con la ciencia planetaria y la exploración del sistema solar con sondas de espacio profundo. Sin duda, es un primer paso en la aplicación futura de VLBI a las misiones planetarias en las próximas décadas. Asimismo representa un magnífico ejemplo de la efectividad de la auténtica cooperación científica a escala global.

Referencias

- Asaki, Y., et al., *RadioScience*, 33, 1297, 1998.
- Bird, M.K., et al., The vertical profile of winds on Titan, *Nature* 2005 (en prensa).
- Bird, M.K., et al., American Astronomical Society, DPS meeting #37, 2005.
- Bird, M.K., et al., The Cassini/Huygens Doppler Wind Experiment: Results from the Titan Descent, 36th Annual Lunar and Planetary Science Conference, in League City, Texas, abstract no.1620, 2005.
- Dongsuk Han et al., “18th International Symposium on Space Flight Dynamics”, celebrado en Munich, Alemania, 2004.
- Hildebrand, C.E. et al., “Radio-Planetary Frame Tie From Phobos-2 VLBI Data”, TDA Progress Report 42-119, 1994.
- Ichikawa et al., An evaluation of VLBI observations for the positioning of NOZOMI Spacecraft and the future direction in research and development of the deep space tracking using VLBI, *IVS CRL/TDC News*, No. 23, pp 31-33, 2003.
- Lanyi et al., Determination of Angular separation between spacecraft and quasars with the Very Long Baseline Array, *IPN Progress Report* 42-162, 2005.
- McElrath, T.P. and Bhat, R.S., “Determination of the Inner Planet Frame Tie Using VLBI Data”, paper 88-4234, *AIAA/AAS Astrodynamics Conference*, Minneapolis, Minnesota, 1988.
- Porcas, R.W. and Rioja, M.J., “Space VLBI Astrometry and Phase-

Reference Mapping with VSOP”, Proc. of the 14th Working Meeting of European VLBI for Geodesy and Astrometry, p.139, 2000.

Rogers, A.E.E, et al., VLBI: The MarkIII system for geodesy, astrometry and aperture synthesis, *Science*, 219, 51-54, 1983.

Ryan, J.W., and Ma. C., NASA-GSFC’s Geodetic VLBI Program: a twenty year retrospective, *Phys. Chem. Earth*, Vol. 23, No. 9-10, pp. 1041-1052, 1998.

Sekido et al., VLBI Application for Spacecraft Navigation (NOZOMI) - follow-up on Model and Analysis, *IVS CRL/TDC News*, No. 23, pp 34-35, 2003.

Thornton, C.L., Border, J.S., “Radiometric Tracking Techniques for Deep-Space Navigation”, Wiley-Interscience, 2003.

Páginas web:

Misión MER, <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/mission/JAXA>, <http://www.muses-c.isas.jaxa.jp/English/>

Misión Hayabusa, <http://www.isas.jaxa.jp/e/enterp/misions/hayabusa/today.shtml>