

PROYECTO MERIT, NUEVAS TECNICAS PARA LA DETERMINACION DE LA  
ROTACION DE LA TIERRA

Lic. Raúl A. PERDOMO

Observatorio Astronómico, Universidad Nacional de La Plata

RESUMEN:

En la década pasada se desarrollaron nuevas técnicas para la determinación del Movimiento del Polo y la velocidad de rotación de la Tierra. Se describen brevemente los principios básicos y principales logros alcanzados por las mismas (técnicas astronómicas clásicas, satélites Doppler, Laser con satélites, Laser con la Luna y Radiointerferometría). El Proyecto MERIT es un programa de colaboración internacional para intercomparar las mencionadas técnicas con vistas a mejorar y reorganizar los servicios existentes. Se describen detalladamente las razones y objetivos de esta campaña.

INTRODUCCION

Desde fines del siglo pasado se realizan determinaciones sistemáticas de tiempo y latitud en distintos observatorios del mundo, mediante la observación de estrellas con instrumentos astronómicos. Los resultados individuales son remitidos al International Polar Motion Service (I.P.M.S.) y al Bureau International de L'Heure (B.I.H.) donde son procesados para obtener las coordenadas del polo de rotación de la Tierra y el TUI. En la pasada década se desarrollaron nuevas técnicas con esta finalidad. Se dan una explicación de cada una de ellas y una descripción del proyecto MERIT, un programa de colaboración internacional "to Monitor Earth Rotation and Intercompare the Techniques of observation and analysis".

1. Movimiento del Polo y Rotación de la Tierra:

El movimiento de la Tierra alrededor de su centro de masa puede descomponerse en dos partes, el movimiento del eje de rotación en el espacio, y el movimiento de la tierra respecto de éste. Las causas principales del primero son las fuerzas externas y su manifestación visible es la variación de las coordenadas de los objetos celestes (por el movimiento del sistema de referencia), su formulación teórica es conocida. El movimiento de la Tierra respecto de su eje de rotación es más complejo en virtud de la cantidad de variables de carácter geofísico involucradas, su consecuencia observable es la variación de las coordenadas geográficas y la duración de una rotación sidérea; debe ser determinado observacionalmente. Los efectos más no

bles y sus causas posibles, pueden resumirse de la siguiente forma (1):

a) Una oscilación libre de período aproximado de 430 días y semi amplitud del orden de ".2. El momento de inercia de la Tierra respecto del eje polar de inercia, es mayor que respecto de los ejes ecuatoriales, por la no esfericidad de la Tierra, y el eje instantáneo de rotación no coincide con el eje polar de inercia. En este caso, la teoría predice un movimiento circular de uno respecto del otro.

b) Una oscilación forzada de período anual y semi amplitud del orden de ".1, causada por cambios estacionales en la distribución de las masas de aire, ciclo de la vegetación, etc.

c) Una variación secular. Distintos autores señalan ".003/año, otros ponen en duda su existencia.

d) Variaciones irregulares de origen desconocido.

Las variaciones en la velocidad angular de rotación permanecieron ocultas hasta la década del 30 en que fue posible contar con relojes de suficiente precisión. Las características principales son: (2):

a) Una variación anual en la duración de una revolución sidérea de semi amplitud algo menor que 1 ms. También asociada a fenómenos meteorológicos estacionales (fundamentalmente, intercambios de cantidad de movimiento entre la atmósfera y los océanos).

b) Una variación secular provocada por el efecto disipativo del rozamiento en el fondo del mar, corrientes oceánicas, etc, ( $^S.002$ /siglo).

c) Variaciones irregulares provocadas por causas desconocidas.

## 2. Servicios Internacionales. Técnicas Astronómicas Clásicas:

Como se mencionó en la introducción, dos centrales mundiales, B. I.H. e I.P.M.S., se encargan de procesar los resultados de tiempo y latitud de los distintos observatorios participantes, para obtener las coordenadas de las estaciones participantes en una época origen, y el TUI, tiempo rotacional de la Tierra, respecto de una escala uniforme derivada del tiempo atómico. La precisión estimada en cada caso, es de ".01 (unos 30 cm sobre la superficie de la Tierra) y  $^S.001$  respectivamente, con una resolución de 5 días. Los resultados finales de cada año son publicados en B.I.H. -Annual Report y Annual Report of the I.P. M.S.

Las estaciones astronómicas que contribuyen con sus resultados son aproximadamente 50. Los instrumentos de que se valen son, básicamente los siguientes: Anteojo Cenital Visual (determinaciones de latitud mediante la observación de distancias cenitales meridianas de pares de estrellas); Anteojo de Pasajes (determinaciones de tiempo mediante la observación de tiempos de paso por el meridiano); Tubo Cenital Fotográfico y Astrolabio (determinaciones de tiempo y latitud con observaciones cenitales y a una altura fija, respectivamente).

## 3. Nuevas Técnicas:

En el año 1972, el B.I.H. incorporó al conjunto de las observaciou

nes astronómicas clásicas, las obtenidas por medio del rastreo de satélites Doppler. En la pasada década se emplearon otras técnicas, a nivel experimental, con la misma finalidad.

a) Radiointerferometría:

El sistema operativo de esta técnica consiste en la observación simultánea de una misma radiofuente desde dos antenas separadas. La diferencia de camino entre las señales recibidas en ambos extremos de la línea de base provoca una diferencia de fase entre las mismas, que es función de la longitud de base, la frecuencia de la señal y el ángulo entre la base y la dirección a la radiofuente (3).

Las coordenadas de las radiofuentes lejanas definen un sistema de referencia inercial respecto del cual cambia la orientación de la base como consecuencia del movimiento de la Tierra. Una vez deducido el movimiento del conjunto en el espacio (variación de las coordenadas por precesión y nutación), lo que resta es provocado por el movimiento del polo y la rotación de la Tierra (4).

Desde el punto de vista instrumental, los interferómetros se pueden separar en dos grandes grupos: conectados (CEI) ó de base larga (VLBI). (5). Los primeros están físicamente conectados, mediante cables ó radioenlace, las distancias máximas alcanzables en cada caso, son de algunas decenas y algunos cientos de km. respectivamente. Las señales de HF recibidas son convertidas en IF mediante un mismo oscilador local y correlacionadas en tiempo real.

En los del tipo VLBI, no existe ninguna vinculación directa entre los extremos de la línea, como tampoco existe límite para la longitud de la misma. Las señales son tratadas en forma independiente y grabadas con marcas de tiempo de los relojes locales perfectamente sincronizados. Con posterioridad se correlacionan las respectivas grabaciones.

b) Rastreo de satélites:

Las técnicas satelitarias reposan en el supuesto conocimiento de la órbita del satélite. En tales circunstancias, el movimiento del satélite, descrito en un sistema inercial, es seguido desde cierto número de estaciones cuyas coordenadas en tal sistema inercial, varían por el movimiento de la Tierra. Las discrepancias entre los valores calculados y observados de la posición del satélite, se interpretan como errores en los parámetros usados en la transformación. En la práctica, estas discrepancias pueden relacionarse con las coordenadas del polo de distinta manera, por ejemplo, en términos de los elementos orbitales. (6).

Sin profundizar mayormente el problema, resulta evidente que la máxima dificultad proviene del supuesto original, el perfecto conocimiento de la órbita en un sistema inercial. Sin embargo, para la determinación del movimiento del polo, tal conocimiento solo es estrictamente necesario en el período durante el cual se realizan las observaciones para dar una posición del polo (menor que 5 días) (7). La situación es distinta si se trata de la determinación de TU1. En efecto, la forma de determinar la rotación es tomar como referencia la posición

en el espacio del plano orbital del satélite a lo largo del tiempo. Tal posición es afectada por distintos fenómenos de carácter secular poco conocidos (algunos términos del potencial de la Tierra, frenado atmosférico, etc.).

En efecto, las observaciones de las distintas estaciones se utilizan para ajustar conjuntamente los parámetros orbitales y las variaciones de las coordenadas por el movimiento del polo. Un error en el tiempo solo causa un mal posicionamiento del plano orbital en un sistema inercial, sin alterar, por ello, la orientación de la tierra en tal sistema ni la determinación del movimiento del polo, aunque obviamente no es posible determinar TU1 (8).

Las técnicas más usadas para el rastreo de satélites son dos: recepción de satélites Doppler y disparos Laser. Las características más importantes de cada una de ellas pueden resumirse así:

Los satélites Doppler emiten señales en dos frecuencias fijas (para eliminar el efecto ionosférico que depende de la frecuencia). La frecuencia recibida por el receptor terrestre varía continuamente por efecto Doppler. El receptor cuenta el número de ciclos recibidos entre  $t_1 + dt_1$  y  $t_2 + dt_2$  (tiempos de la estación), que es igual al enviado entre  $t_1$  y  $t_2$  (tiempo del satélite). Como  $dt_1$  y  $dt_2$  (tiempos que tarda la señal en recorrer la distancia satélite-receptor) dependen de las distancias al comienzo y fin del conteo de ciclos, es posible establecer ecuaciones de diferencias de distancia en función de la cuenta observada (9). El sistema Doppler tiene la virtud de ser operable en cualquier condición climática.

El rastreo de satélites mediante disparos Laser consiste en medir el tiempo empleado por un pulso Laser en reflejarse en el satélite y ser recibido en la misma estación emisora. Los pulsos Laser son dirigidos ópticamente para lograr dispersiones del haz del orden de  $10''$ , el mismo sistema óptico recibe el rebote en el satélite. La precisión de una medida es algo mejor que la del sistema Doppler (alrededor de 1m.), en cambio el sistema Laser está limitado en su capacidad operativa por las condiciones atmosféricas. Una importante característica de este sistema es el carácter pasivo del elemento del satélite que participa en la medida (retroreflectores).

Es oportuno señalar las características que hacen del Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) el elemento más apropiado para esta aplicación. El Laser es un emisor de radiación de muy elevada intensidad, obtenida por el proceso de emisión estimulada gran direccionalidad, fase y frecuencia muy bien definidas. (10).

c) Distancia Tierra-Luna con disparos Laser:

La misión Apolo 11 (1969) condujo a la superficie lunar el primer panel de retroreflectores. Con posterioridad fueron instalados otros cuatro: Luna 17 (1970), Apolos 14 y 15 (1971) y Luna 21 (1973). (11).

De lo dicho anteriormente, podría pensarse que la determinación de la distancia Tierra-Luna no es más que un caso particular de aplicación de la técnica descrita para los satélites, sin embargo, el problema tiene características muy especiales: en lo técnico, porque la

distancia a la Luna exige una gran potencia de disparo, una muy baja dispersión del haz, una técnica de apuntado y seguimiento sofisticada y ajustable para las distintas condiciones del día luna. (12). En lo técnico, porque el movimiento de rotación de la Luna, sus parámetros orbitales, perturbaciones, intercambios de energía en el sistema Tierra-Luna, etc. (13), están directamente involucrados en las medidas.

El sistema es particularmente interesante por su potencialidad en contribuir al conocimiento de la teoría lunar. La estabilidad de su plano orbital permite estudiar la rotación de la Tierra durante algo así como 10 años, sin introducir errores sistemáticos apreciables.

#### 4. Proyecto MERIT:

Como puede inferirse de lo expuesto, resulta impostergable conocer la real capacidad de operación, y la precisión relativa de los distintos sistemas. Es así como en el transcurso del simposio n° 82 de la U.A.I. sobre rotación de la Tierra, se dieron los primeros pasos mediante la constitución de un grupo de trabajo para el estudio del problema. La propuesta del grupo mencionado (proyecto MERIT) fue aprobada en las Asambleas Generales de la U.A.I. (Montreal, 1979) y de la U.G. G.I. (Canberra, 1979). El sistema operativo y los objetivos perseguidos pueden resumirse de la siguiente manera: el programa ha sido dividido en dos etapas, una campaña corta y una campaña principal, ambas subdivididas en distintas fases (preparación, observación, análisis y conclusiones).

La fase observacional de la campaña corta se encuentra en pleno desarrollo (1° de agosto al 31 de octubre de 1980). Los objetivos de la misma son:

- a) Chequear y mejorar las respectivas organizaciones para la campaña principal.
- b) Impulsar el desarrollo de las nuevas técnicas.
- c) Proveer información comparativa para la preparación de la campaña principal.
- d) Obtener un sistema homogéneo y consistente de posiciones de las estaciones participantes.
- e) Chequear la posibilidad de detectar fluctuaciones de corto período y proveer un servicio rápido para las mismas.

La fase observacional de la campaña principal se desarrollará desde mediados de 1983 a 1984 (al menos, un año). Las tareas a desarrollar durante la fase preparatoria se establecerán en función de los datos y resultados obtenidos durante la campaña corta. Los objetivos generales de esta etapa son los siguientes:

- a) Comparar las distintas técnicas y su real capacidad operativa con vistas a organizar los servicios internacionales.
- b) Obtener una cantidad y variedad de datos sobre la rotación de la Tierra que contribuyan a mejorar conocimientos de fenómenos geofísicos y astronómicos de gran importancia.

## 5. Conclusiones:

La determinación del movimiento del polo mediante técnicas satelitarias ha alcanzado un importante grado de madurez. La precisión obtenida es del mismo orden que la del B.I.H., y seguramente se incrementará en la medida que se perfeccionen los modelos del potencial terrestre, presión de radiación solar, albedo, frenado atmosférico, etc.

Los trabajos realizados mediante VLBI son escasos y discontinuos aunque muy promisorios (un orden mejor que el B.I.H.?). Con CEI, el equipo de NRAO (largo de base 35 km.) determina variaciones de tiempo y latitud en forma continuada, pero una sola base no permite separar los tres parámetros a determinar. Se prevee una intensificación de aportes radiointerferométricos en los próximos años.

Con respecto al Laser con la Luna, solamente una estación (Mc Donald-Texas) ha operado regularmente, aunque varias más se encuentran en una etapa experimental. La técnica ha resultado más complicada de lo esperado, pero el grado de complejidad depende en buena parte del destino que se pretenda dar a su utilización futura. (12).

La obtención de resultados en forma continua y simultánea, en el marco del programa MERIT, proveerá una base firme para vislumbrar el futuro de los servicios que determinan el movimiento de rotación de la Tierra. La diversidad de técnicas y sistemas de referencia empleados, permiten augurar un mejoramiento en la precisión y resolución de los resultados, en el curso de la presente década.

## REFERENCIAS

1. Markowitz, W.: 1976, *Sky and Telescope* 52, p. 99.
2. Melchior, P.: 1972, "Physique et Dynamique Planétaires", *Vander-editeur, Louvain-Bruxelles*, vol. 1.
3. Elsemore, B.: 1979, "Time and the Earth's Rotation", *I.A.U. symp.* 82, p. 177.
4. Johnston, K.: 1979, "Time and the Earth's Rotation", *I.A.U. symp.* 82, p. 183.
5. Counselman, C.: 1976, *Ann.Rev.Astron.Astrophys.*, 14, p. 197.
6. Lambeck, K.: 1972, "Rotation of the Earth", *I.A.U. symp.* 48, p.123.
7. Smith, D.; Kolenkiewicz, R.; Dunn, R.; Torrence, M.: 1979, "Time and the Earth's Rotation", *I.A.U. symp.* 82, p. 231.
8. Anderle, R. and Beuglass, L.: 1970, *Pull.Géodes.*, 96, p. 125.
9. Ashkenazi, V.; Gough, R.; Sykes, R.: 1977, "Determinación de Posiciones Geodésicas por medio de Satélites Doppler", *editor-Instituto Geográfico Militar Argentino*.
10. Garavaglia, M.: 1976, "El Laser", *serie de Física, monografía n° 12*, editor Organización de los Estados Americanos.
11. Bender, P.; Currie, D.; Dicke, R.; Eckhardt, D.; Faller, J.; Kaula W.; Mulholland, J.; Plotkin, H.; Poultney, S.; Silverberg, E.; Wilkinson, D.; Williams, J.; Alley, C.: 1973 *Science* 182, p. 229.

12. Silverberg, E.: 1979, "Time and the Earth's Rotation", I.A.U. symp. 82, p. 247.
13. Kovalevsky, J.: 1974, "New Problems in Astrometry", I.A.U. symp. 61, p. 269.