1. Geodesia VLBI en Europa

A. RIUS, N. ZARRAOA

Instituto de Astronomía y Geodesia (U.C.M.-C.S.I.C.) Facultad de Ciencias Matemáticas Universidad Complutense, Madrid

у

J. CAMPBELL

Geodätisches Institut der Universität Bonn Nussallee, 17. D-5300. Bonn-1, R.F.A.

1. INTRODUCCION

La Radiointerferometría de Grandes Bases (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) es una técnica de observación radioastronómica que permite, entre otras cosas, medir distancias del orden del tamaño de la Tierra con precisiones de unos pocos centímetros, lo que equivale a una precisión relativa de 10E-8. Esta precisión es aún mejor para líneas de base más cortas, como las que existen dentro del continente europeo.

Este hecho permite plantearse la determinación experimental en tiempo real (unos pocos años), de fenómenos geodinámicos como la deriva de los continentes.

En este artículo nos proponemos la descripción de una serie de experimentos agrupados dentro de la denominación «Eastern Atlantic» (E.ATL) y cuyos objetivos principales son la determinación precisa de las velocidades de separación de los continentes americano y europeo y los posibles movimientos internos existentes dentro de este último, así como el establecimiento de una red geodésica VLBI en Europa que sirva de fundamento para estudios geodinámicos regionales. De igual forma se presentan algunos resultados obtenidos en esta serie de observaciones.

Participan en estos experimentos Goddard Space Flight Center, como organismo coordinador, el Instituto Geodésico de la Universidad de Bonn, el Onsala Space Observatory, el Instituto de Radioastronomía de Bolonia y el Instituto de Astronomía y Geodesia de Madrid a través de diversos convenios de cooperación.

2. OBSERVABLES E INSTRUMENTACION

2.1. Observables

Los observables VLBI de interés en geodesia son las diferencias entre los tiempos de llegada a las diversas antenas que constituyen la red VLBI

geodésica de un frente de ondas electromagnéticas procedentes de cada una de las fuentes observadas durante un experimento.

Estos observables se obtienen tras un proceso de dos etapas. En la primera se registran las señales procedentes de quasares en cada uno de los radiotelescopios de forma simultánea, y en la segunda los distintos registros son comparados (correlados) en un centro común, para determinar los observables mencionados.

Un observable secundario, pero también útil para el proceso de los experimentos de radiointerferometría geodésica, se obtiene igualmente del proceso de correlación. Se trata de la velocidad de variación del retardo de la señal con el tiempo.

Elementos importantes que determinan la precisión de las medidas son el tamaño de la antena, el ancho de banda del registro y la estabilidad del sistema de tiemposy frecuencias.

2.2. Registro de las señales

Las observaciones requieren el uso de una red de antenas dotadas de una instrumentación compatible. La red utilizada en estos experimentos está constituida por los radiotelescopios detallados en la tabla 2.1. Las antenas europeas de esta red están distribuidas tal como se indica en la figura 1.

Cada uno de estos elementos del interferómetro está dotado de la siguiente instrumentación (ver figura 2):

Radiotelescopios	· País	Diámetro
Wettzell	R.F.A.	20 m.
Onsala	Suecia	20 m.
Bolonia	' Italia	32 m.
Noto	Italia	32 m.
Madrid	España	34 m.
Westford	U.S.A.	18 m.
Richmond	U.S.A.	17 m.

TABLA 2.1 Radiotelescopios incluidos en la red del E.ATL

Sistema de recepción simultánea en las bandas de frecuencia S (2200 MHz) y X (8400 MHz), con un ancho total de banda de 100 MHz en Banda S y de 400 MHz en Banda X.

- Receptores de bajo ruido.

- Terminal de adquisición de datos Mark III VLBI, capaz de registrar 28 canales simultáneamente, con una velocidad de muestreo de 4 Megabits por segundo en cada canal.
- Sistema de tiempo y frecuencia que incluye un MASER de hidrógeno.



Figura 1.—Distribución de las antenas europeas que participan en las campañas E.ATL.

Geodesia VLBI en Europa

-



Figura 2.-Instrumentación de la Estación Espacial de Madrid utilizada en experimentos VLBI.

14

Esta instrumentación básica está suplementada con

 Sensores de presión, humedad relativa y temperatura atmosféricas, calibradores de fase de la señal y de la longitud del cable por la que ésta se propaga.

Otros recursos necesarios para calibrar con mayor exactitud los efectos que produce la troposfera, como los radiómetros de vapor de agua (miden el nivel de vapor de agua en la atmósfera en la dirección de observación), sólo están disponibles, de momento, en algunos de los observatorios citados.

Esta instrumentación, sin modificar su funcionalidad, está siendo mejorada constantemente con el objetivo de reducir el ruido de las observaciones. Entre 1978 y 1988 se ha pasado de errores de 10 cm. a errores de 1 cm. El objetivo a alcanzar en la próxima década es la reducción del ruido al nivel del milímetro.

2.3. Correlación

Los datos obtenidos en los experimentos E.ATL-3, E.ATL-4 y E.ATL-5 realizados en 1988 han sido correlados en el correlador Mark III del Max Plank Institute für Radioastronomie. Los experimentos E.ATL-1 y E.ATL-2 de 1989 lo han sido en el correlador de Washington, en Estados Unidos.

3. EXPERIMENTOS REALIZADOS

Desde el mes de agosto de 1988, fecha a partir de la cual el Madrid Deep Space Communications Complex de NASA dispone de un sistema de adquisición de datos VLBI Mark III instalado de forma permanente, hasta julio de 1989, se han realizado cinco experimentos del proyecto Eastern Atlantic. La tabla 3.1 detalla las fechas y las estaciones que han intervenido en cada uno de ellos.

Cada uno de estos experimentos ha consistido en una sesión de 24 horas consecutivas de observación, en la cual las distintas estaciones que intervienen en el proyecto observan de forma simultánea un conjunto de quasares.

Por razones de índole operativa, durante las tres primeras observaciones la distribución de radiofuentes observadas fue análoga a la que se usa en otras campañas de VLBI geodésico global. En las siguientes se ha usado una distribución optimizada para conseguir la máxima precisión en la estimación de los parámetros que definen las líneas de base europeas.

TABLA 3.1.

Experimentos E.ATL realizados

Nombre	Fecha	Horas	Estaciones	N.º de Observ.
E.ATL-3/88	31 agosto	20:00	Madrid	100
t í	1 septiembre	20:00	Wettzell	200
	1988	ΤU	Onsala	200
			Medicina	135
			Richmond	94
			Westford	202
E.ATL-4/88	9 noviembre	20:00	Madrid	135
,	10 noviembre	20:00	Wettzell	160
	1988	ŤU	Onsala	138
			Medicina	140
			Richmond	118
			Westford	170
E.ATL-5/88	14 diciembre	20:00	Madrid	132
2	15 diciembre	20:00	Wettzell	151
	1988	TU	Onsala	135
			Medicina	137
		1	Richmond	116
			Westford	162
E.ATL-1/89	20 febrero	16:00	Madrid	162
	21 febrero	16:00	Wettzell	175
	1989	ΤU	Onsala	175
		1	Medicina	173
			Westford	97
E.ATL-2/89	3 junio	07:20	Madrid	159
· .	4 junio	07:20	Wettzell	170
	1989	TU	Onsala	172
			Noto	147
			Westford	96
	-1		۱ ا	

Las radiofuentes observadas así como sus coordenadas se indican en la tabla 3.2. Estas constituyen un subconjunto del catálogo de GSFC, siendo sus principales características:

- Son radiofuentes extragalácticas sin estructura observada en líneas de base intercontinentales.

e

 Su densidad de flujo es suficiente para estimar retardos con errores formales de un centímetro en pocos minutos en una red con antenas de diámetro mayor que 20 metros.

TABLA 3.2

Radiofuente	AR 2000.0	Dec 2000.0	
1741-038	17 43 58.85612	-3 50 4.6127	
1156 + 295	11 59 31.83700	29 14 43.7100	
OQ208	14 7 .39432	28 27 14.6900	
$16\overline{3}3 + 38$	16 35 15.49282	38 8 4.5025	
1803 ± 784	18 0 45 68346	78 28 4.0198	
VR422201	22 2 43.29139	42 16 39,9825	
2121 ± 053	21 23 44.51727	5 35 22.0971	
3C454.3	22 53 57.74797	16 8 53.5636	
0420-014	4 23 15.80072	-1 20 33.0637	
0229 + 131	2 31 45.89410	13 22 54.7177	
0106 ± 013	1 8 38.77108	1 35 .3196	
0552 + 398	5 55 30.80567	39 48 49.1642	
4C39.25	9 27 3.01384	39 2 20.8506	
0742 ± 103	7 45 33.05957	10 11 12.6870	
0J287	8 54 48.87491	20 6 30.6397	
1055 ± 018	10 58 29.60496	1 33 58.8277	
0212 + 735	2 17 30.81373	73 49 32.6223	
0234 + 282	22 36 22.47090	28 28 57.4160	

Radiofuentes utilizadas en los experimentos E.ATL

4. HERRAMIENTAS DE ANALISIS

4.1. El modelo

Uno de los resultados de la correlación, tal como se ha indicado en el apartado 2, es la diferencia entre los tiempos de paso de una onda electromagnética por las distintas antenas. Estas diferencias son medidas en términos de los tiempos atómicos observados en los relojes de cada una de ellas que supondremos, por brevedad, que corresponden a sus tiempos propios respectivos.

Los observables así obtenidos, que reciben el nombre de retardos, son interpretados en términos de diferentes modelos que engloban los principales fenómenos implicados.

4.1.1. Modelo Geométrico

En la figura 3 puede verse la geometría básica de un interferómetro ideal. El modelo geométrico viene determinado por la posición de los elementos del interferómetro y de las radiofuentes, y por la trayectoria de la onda electromagnética procedente de la fuente.



Figura 3.-Geometría básica de un interferómetro de dos elementos.

Algunos fenómenos que alteran la geometría del interferómetro (deriva de los continentes, mareas terrestres, etc.) se expresan convenientemente en un sistema de referencia ligado a la Tierra (Sistema de Referencia Terrestre), otros (direcciones de las radiofuentes, tiempo coordenado) se expresan adecuadamente en un sistema ligado al baricentro del Sistema Solar (Sistema de Referencia Celeste) en el que los objetos extragalácticos, en media, no presentan movimientos propios. Finalmente deben considerarse sistemas de referencia locales ligados a cada una de las antenas en los que se determina el tiempo atómico o tiempo propio.

Los distintos sistemas de referencia citados deben ser interrelacionados mediante modelos lo más precisos posibles de fenómenos como la precesión y nutación, el movimiento de la Tierra en el Sistema Solar o el movimiento del Polo. Las diferencias entre el tiempo propio en cada una de las antenas y el tiempo atómico medido en ellas es un fenómeno que también debe ser modelado (Sovers y Fanselow, 1987).

El Sistema de Referencia Terrestre gira y se desplaza en el sistema de referencia (quasi-inercial) ligado al baricentro del Sistema Solar. Estos efectos producen variaciones entre tiempo propio y tiempo coordenado, con los siguientes órdenes de magnitud:

Efectos	Velocidad	Orden de magnitud
Rotación de la Tierra (v/c)** 2	300 m/seg.	10 E-12
Desplázamiento (v/c)** 2	30 km/seg.	10 E- 8

Como la precisión actual en la medida del tiempo, que se obtiene usando MASERS de hidrógeno, es del orden de 10E-14, estos efectos deben incorporarse en el modelo geométrico.

En un Sistema de Referencia Terrestre cada una de las antenas sufre desplazamientos que varían la geometría del radiointerferómetro y que, por tanto, deben ser modelados. Los principales fenómenos son:

- Tectónica de placas.

El modelo de Minster y Jordan (1978) predice movimientos relativos de las diversas placas que constituyen la corteza terrestre del orden devarios centímetros por año. Movimientos locales y regionales también han sido observados.

- Mareas Terrestres.

La Tierra no es un cuerpo rígido. La acción gravitatoria del Sol y la Luna produce variaciones en la posición de los puntos de la corteza terrestre. La respuesta de la Tierra a dicha acción viene convolucionada por las características de la geología local. El resultado es que la componente radial de la posición de la antena sufre variaciones de período semidiurno de hasta 30 centímetros (Melchior, 1983).

- Respuesta elástica de la corteza terrestre a la marea oceánica.

La carga de la marea oceánica sobre la corteza continental induce una respuesta elástica de la misma que provoca movimientos que pueden llegar a ser hasta de unos pocos centímetros incluso en puntos alejados de las costas (de Toro, 1989).

 Respuesta elástica de la corteza terrestre a las variaciones de la presión atmosférica.

En este caso son las variaciones de la presión atmosférica las que inducen variaciones en la componente radial del orden de 1 mm. por milibar (Rabbel y Schuh, 1986).

Además de estos efectos deben considerarse los producidos por el Sol, los planetas y la misma Tierra sobre las trayectorias y los tiempos de propagación de los fotones desde la fuente emisora a cada una de las antenas. El cambio producido por la materia sobre la geometría, y por lo tanto sobre las trayectorias de los fotones, produce el fenómeno de la deflexión gravitatoria de la dirección de propagación de la luz predicho por Einstein. La variación del tiempo de propagación constituye un efecto distinto predicho por I. Shapiro (ver Misner, Thorne y Wheeler, 1973). Si calculamos las diferencias de este tiempo de propagación para las distintas antenas, suponiendo la presencia del Sol o de Júpiter, obtendremos una corrección de varios centímetros. (En Hellings, 1986, puede encontrarse la discusión de otro efecto gravitacional observable con la instrumentación actual.)

4.1.2. Modelo Atmosférico

El frente de ondas sufre alteraciones en su trayectoria debido al diferente camino recorrido por la señal en la troposfera y en la ionosfera hasta llegar a cada una de las antenas. Ambos efectos son de naturaleza diferente y requieren modelos diferentes. (Treuhaft y Lanyi, 1987; Sovers y Fanselow, 1987.)

Es en la actualidad el efecto atmosférico, especialmente el producido por el vapor de agua contenido en la troposfera, el principal obstáculo para la mejora de las precisiones en los resultados obtenidos mediante las técnicas VLBI.

4.1.3. Modelo de Deformaciones Locales

Los instrumentos pueden sufrir variaciones en su geometría debido a deformaciones originadas por el cambio de orientación de las antenas, cambios de temperatura o por el efecto del viento sobre las grandes estructuras parabólicas de las antenas (Rius et al, 1987).

4.2. Implementación de los modelos

Existen en la actualidad, diversos paquetes de software para el análisis de los observables VLBI para fines geodésicos. Dos de ellos han sido desarrollados por grupos creados alrededor de Goddard Space Fligth Center y de Jet Propulsion Laboratory. Estos paquetes son capaces de procesar de forma conjunta y simultánea varias líneas de base y varios experimentos. Estos paquetes de programas se denominan, respectivamente, CALC (Ryan et al, 1985) y MASTERFIT (Sovers y Fanselow, 1987).

El uso de recursos específicos de los sistemas operativos de los ordenadores en los que fueron creados estos paquetes: HP1000 y VAX11/785 respectivamente, hacen difícil su transporte a otros entornos.

Para tener la capacidad de procesar observables VLBI, independientemente de los sistemas mencionados, en un entorno general, el Instituto Geodésico de la Universidad de Bonn inició el proyecto «Bonn VLBI Software System» (BVSS). A diferencia de los paquetes anteriores, éste es capaz tan sólo de procesar datos correspondientes a una línea de base. La ventaja importante de este paquete sobre los anteriores radica en la facilidad con que pueden incorporarse en el modelo del retardo fenómenos anteriormente no considerados o nuevas formulaciones. Este paquete esta bien adaptado, por tanto, a tareas de investigación y desarrollo y en cambio presenta problemas en la fase de producción de resultados.

Para solventar estos problemas, el Instituto Geodésico de la Universidad de Bonn y el Instituto de Astronomía y Geodesia de Madrid están desarrollando una versión avanzada del BVSS. Esta versión tendrá la posibilidad de procesar simultáneamente varios experimentos con varias líneas de base en cada experimento, en cualquier procesador capaz de compilar programas escritos en FORTRAN (ANSI X3.9-1978 FORTRAN).

Las diferencias entre los distintos modelos residen fundamentalmente en:

	CALC	MASTERFIT	BVSS
Efemérides del Sistema Solar	MIT PEP Ephemeris	JPL DE 200 Ephemeris	Aproximación analítica
Relatividad general	Sol	Sol + Planetas (Moyer, 1971)	Sol + Planetas (Finkelstein et al, 1985)

Aún no se han realizado comparaciones exhaustivas entre los diferentes programas. No obstante, en comprobaciones parciales entre CALC y MASTERFIT se han encontrado discrepancias del orden de 2-3 cm (Sovers y Ma, 1985) y del mismo orden entre CALC y BVSS (Schuh, 1987).

5. RESULTADOS PRELIMINARES

Aunque hasta junio de 1989, el número de experimentos realizados dentro del proyecto E.ATL ha sido de cinco, sólo se han correlado y analizado cuatro de ellos. En este apartado vamos a presentar algunos resultados preliminares obtenidos de estos experimentos analizados, especialmente para las líneas de base europeas.

Estos experimentos han sido analizados en tres instituciones diferentes utilizando dos paquetes de análisis. Los tres primeros experimentos, E.ATL-3, E.ATL-4 y E.ATL-5, realizados todos ellos en 1988, han sido correlados en el Max Plank Institut Für Radioastronomie en Bonn, y se han analizado en el Instituto de Geodesia de la Universidad de Bonn utilizando el paquete CALC-SOLVE, y en el Instituto de Geodesia de Madrid mediante la última versión del paquete BVSS. Por su parte el experimento E.ATL-1 que se llevó a cabo en febrero de 1989 ha sido analizado en Estados Unidos por el grupo de VLBI del Goddard Space Flight Center, utilizando el paquete CALC.

La figura 4 nos muestra la evolución de la longitud de una línea de base europea, entre Medicina (Bolonia, Italia) y Madrid, a lo largo de estos cuatro experimentos, con sus correspondientes barras de error. Puede apreciarse en estas últimas cómo la calidad de los datos mejora en cada experimento, como consecuencia de mejoras introducidas en la estrategia de cada observación, encaminadas a mejorar la estimación de las posiciones de la subred europea.

Tanto el pequeño número de experimentos realizados como el período de tiempo, relativamente corto, transcurrido entre ellos impiden extraer conclusiones claras de la situación que se presenta en la figura 4. Sin



Figura 4.-Longitud de la línea de base Medicina-Madrid (+1378850 m) en función de la época.

A. Rius, N. Zarraoa y J. Campbell

22

embargo, a pesar de que los resultados han sido obtenidos en diferentes instituciones y los experimentos han sido realizados en condiciones diferentes, se observa que los resultados de la línea de base se agrupan en una reducida banda de menos de tres centímetros de anchura, ocurriendo lo mismo para las demás líneas de base europeas.

En el análisis del experimento E.ATL-5, el paquete BVSS ha procesado cada línea de base participante en el experimento, utilizando un sistema automático de detección y corrección de variaciones bruscas en el comportamiento del reloj de las estaciones. En la figura 5 vemos una comparación entre dos soluciones obtenidas mediante el paquete CALC y la obtenida con la versión más avanzada del paquete BVSS, para la línea de base entre Wettzell (R.F.A.) y Madrid, correspondiente a este experimento.

Las dos soluciones obtenidas mediante el CALC obedecen a dos estrategias de análisis. la primera de ellas, número I en la figura, supone fijas todas las estaciones salvo Medicina en Italia y Madrid, y ajusta los parámetros de rotación de la Tierra. La segunda estrategia, número 2 en la figura, ajusta todas las estaciones salvo Wettzell, permaneciendo fijos los parámetros de rotación de la Tierra dados por el Internacional Earth Rotation Service. La tercera solución en la figura es la dada por el BVSS.

Puede observarse que el nivel de ruido obtenido mediante este último paquete es superior al proporcionado por CALC, el cuál prácticamente no varía entre las dos estrategias de análisis empleadas. La diferencia de ruido entre ambos paquetes se debe a que el análisis del BVSS se limita a esa línea de base, en tanto que CALC procesa el experimento completo de forma conjunta.

En la línea de base presentada en la figura 5 se observa que los tres resultados presentados son muy similares, dentro de una banda de pocos milímetros. En otras líneas de base europeas el comportamiento ha sido muy similar, con discrepancias de dos centímetros como máximo.

Por último presentamos los resultados correspondientes a dos líneas de base, una transoceánica, Westford-Wettzell, y otra europea, Medicina-Madrid, procesadas con la nueva versión del paquete BVSS, con gráficas que muestran los residuos de los observables tras el ajuste y con el valor de los parámetros estimados (figuras 6 y 7).

El error formal que presenta la línea de base transoceánica apenas supera los dos centímetros, a pesar de haber sido procesada individualmente.

Por otra parte, en la estación de Medicina se habían detectado algunos saltos en el comportamiento del reloj durante el análisis realizado en la Universidad de Bonn. El sistema automático de detección y elimitación de estos saltos que ha sido implementado en la nueva versión del BVSS se ha mostrado muy eficaz en esta línea de base, como se puede ver en el comportamiento final de los residuos, obteniéndose un nivel de precisión muy bueno teniendo en cuenta que se trata del ajuste de una única línea de base.



Figura 5.-Estimaciones de la longitud de la línea de base Wettzell-Madrid (+1655410 m) para tres métodos de análisis distintos.



Figura 6.—Residuos obtenidos en el ajuste de los datos obtenidos en la línea de base intercontinental Westford-Wettzell en el experimento E.ATL-5.



Figura 7.-Residuos obtenidos en el ajuste de los datos obtenidos en la línea de base europea Medicina-Madrid en el experimento E.ATL-5.

26

6. CONCLUSIONES

A través de la realización de un conjunto de experimentos radiointerferométricos hemos determinado la posición relativa de diversos puntos situados en el continente europeo, entre los cuales se encuentra la Estación Espacial de Madrid.

Los primeros análisis de estos datos, realizados en distintas instituciones con diferentes sistemas, nos permiten concluir que hemos obtenido precisiones formales y, probablemente, exactitudes del orden del centímetro en las posiciones relativas. La continuidad en la obtención de resultados con este nivel de precisión nos debe permitir en pocos años obtener nueva información acerca de la geodinámica de nuestro continente.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento al personal de la Estación Espacial de Madrid por la decisiva ayuda que nos han proporcionado en la fase de adquisición de datos. El tiempo de observación ha sido obtenido a través de un acuerdo entre INTA y NASA. Ayudas parciales para el análisis de estos datos se han obtenido a través de una Acción Integrada Hispano Alemana. Este trabajo corresponde a una fase del Proyecto de Investigación PB 88-0021, subvencionado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología. Néstor Zarraoa agradece el soporte económico prestado por Caja Madrid.

REFERENCIAS

Finkelstein, A. M.; Kreinovich, V. J., y Pandey, S. N. (1983): Astrophysics and Space Science, vol. 94.

Hellings, R.W. (1986): The Astronomical Journal, vol. 91, núm. 3.

Melchior, P. (1983): The Tides of the Planet Earth, Ed. Pergamon Press, Gran Bretaña.

Minster, J. B., y Jordan, T. H. (1978): Journal of Geophysical Research, vol. 83.

Misner, C. W.; Thorne, K. S., y Wheeler, J. A. (1973): Gravitation, Ed. W. H. Freeman & Co., EE.UU.

Moyer, T. D. (1971): Technical Report 32-1527, JPL, EE.UU.

Rabbel, W., y Schuh, H. (1986): Journal of Geophysics, vol. 59.

- Rius, A.; Rodríguez, J., y Campbell, J. (1987): Geodetic VLBI with Large Antennas, XII EGS Meeting, Estrasburgo.
- Ryan, J.; Gordon, D., y Ma, C. (1985): CALC 6.0 Released, GSFC Technical Memorandum, EE.UU.

Sovers, O. J., y Fanselow, J. L. (1987): JPL Publication 83-89, Rev. 3, EE.UU.

Sovers, O. J. y Ma, C. (1985): TDA Progress Report 42-83, EE.UU.

Thompson, A. R.; Moran, J. M., y Swenson, G. W. (1986): Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, Ed. J. Wiley & Sons, EE.UU.

De Toro, C. (1989): Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.

Treuhaft, R. N., y Lanyi, G. E. (1987), Radio Science, vol. 22, núm. 2.