



## Resolución de ambigüedades en tiempo real a escala regional con ayuda de tomografía ionosférica.

### *Real-time GPS ambiguity resolution at regional scales by means of ionospheric tomography.*

O.L. Colombo<sup>(1)</sup>, M. Hernández-Pajares<sup>(2)</sup>, J.M. Juan<sup>(2)</sup>, J. Sanz<sup>(2)</sup> and J. Talaya<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> USRA/NASA GSFC Code 926, Greenbelt, Maryland, USA

<sup>(2)</sup> Group of Astronomy and Geomatics, Univ. Politec. de Catalunya (gAGE/UPC), Barcelona, Spain

<sup>(3)</sup> Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, Spain

#### SUMMARY

A differential GPS technique have been tested for use in real-time, decimeter-level, kinematic positioning. It involves ionospheric refraction corrections obtained with fast tomographic modelling of Total Electron Content, using GPS data from regional reference stations.

The proof of this concept has been done in March of 1999 navigating a road vehicle at a distance of 116 km from the nearest reference station (located at the vertices of a triangle with 200-300 km sides). The rover is navigated kinematically using the broadcast ephemerides as in real-time. In the ionosphere-corrected L1 and L2 carrier-phase double-differences, ambiguities are resolved by a geometry-free method. This is incorporated into a Kalman filtering scheme, with error states for rover coordinates, tropospheric zenith delay at each receiver, GPS broadcast ephemeride errors, and L1, L2 linear combination biases.

#### 1. INTRODUCCION

El posicionamiento o la navegación de una manera precisa requieren la utilización de la fase como observable básico. Sin embargo, el empleo de este dato requiere resolver su ambigüedad entera asociada. Mediante dobles diferencias de la fase es posible determinar estas ambigüedades cuando la distancia entre los receptores no es mayor que unas decenas de kilómetros ("Local Area Differential GPS", LADGPS): a estas distancias los errores de las órbitas y los retardos atmosféricos (troposfera e ionosfera) afectan de igual modo a los dos receptores, y básicamente se cancelan al formar las dobles diferencias.

A distancias del orden 100 km ("Regional Area DGPS", RADGPS) los errores en las órbitas no aumentan de una manera significativa para impedir la determinación de estas ambigüedades. El retardo troposférico, aunque puede ser suficientemente distinto en ambos receptores, puede ser modelado, o convenientemente estimado, en los receptores de referencia. El retardo ionosférico, sin embargo, es mucho más difícil de tratar y los errores en su determinación pueden ser suficientes para impedir la resolución de estas ambigüedades.

Una estrategia para la resolución de este último problema, se basa una determinación lo suficientemente precisa del retardo ionosférico, para un conjunto de estaciones de referencia, de manera que pueda obtenerse su retardo ionosférico inambiguo doble diferenciado. Esta ionosfera inambigua puede ser entonces adecuadamente interpolada para la posición del receptor móvil OTF (On The Fly). Ello requiere una determinación del retardo ionosférico en las estaciones de referencia con una exactitud por debajo de 15 cm en L1 (Hernandez-Pajares et al. 1999a). Varios métodos se han propuesto para llevar a cabo esta estimación cuando la actividad ionosférica es suficientemente baja (vease p.e. Gao et al. 1997), sin embargo estos métodos están dejando de funcionar a medida que se avanza hacia el máximo de actividad solar (el ciclo de la actividad solar tiene un periodo de unos 11 años).

En este trabajo se demuestra que estas exigencias de precisión en la determinación de la refracción ionosférica, a escalas regionales de centenares de kilómetros, pueden superarse mediante la utilización del modelo tomográfico descrito en (Hernandez-Pajares et al. 1999a y 1999b). Se trata de un modelo cuyas características más importantes son su capacidad para operar en tiempo real y la

utilización de las fases de las portadoras de la señal GPS como observable básico. La no utilización del código permite evitar los errores debidos al multicamino y ruido del código, que son varios órdenes de magnitud superiores a los de la fase. Por otra parte, el modelo es básicamente inmune a la encriptación del código (Antispoofing).

Los resultados que se presentan, corresponden al experimento realizado el día 23 de marzo de 1999, entre las 14h y 17h, con el conjunto de estaciones permanentes BELL, CREU, EBRE y ESCO que se muestran en la figura 1, todas ellas pertenecientes a la red CATNET del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) (Talaya et al. 1999). Las tres últimas se tomaron como estaciones de referencia, mientras que la primera (BELL) se utilizó como test tanto para la corrección ionosférica como para el posicionamiento del vehículo (la distancia entre esta estación y el vehículo era tan sólo de varios kilómetros). A destacar que el experimento se ha realizado en las proximidades del máximo de actividad solar, previsto para principios del año 2000).

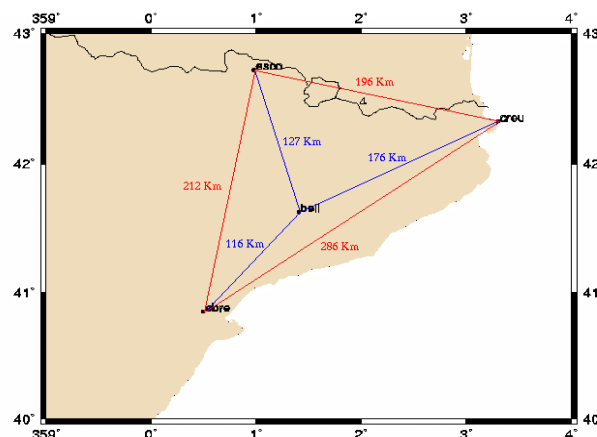


Figura 1 - Red permanente de estaciones CATNET



## 2. RESOLUCION DE LAS AMBIGUIDADES EN LAS ESTACIONES DE REFERENCIA.

Dado que en las estaciones de referencia se conocen las coordenadas con precisión, es posible la determinación de la ambigüedad (no entera) B3 en la combinación "libre de ionosfera" (L3) en tiempo real. De esta forma la ambigüedad N5 en la combinación "wide lane" (L5) puede obtenerse a partir de:

$$\lambda_5 N5 + \text{ruido}(L5) + \text{error}(I5+B3) = L5 - L3 - I5 + B3 \quad (1)$$

donde I5 es el retardo ionosférico en L5, obtenido mediante el modelo tomográfico en tiempo real.

Es crítico que el error de rango combinado más el ruido de la wide lane sea menor que 43cm ( $\lambda_5/2$ ). Un factor limitante de la exactitud de la corrección ionosférica es la baja elevación de los satélites, siendo dichas correcciones seguras (según indican diferentes test realizados) por encima de 20 grados.

El conocimiento de la ambigüedad N5, juntamente con la refracción ionosférica I5, permite la determinación del resto de ambigüedades y en concreto de la ambigüedad en la "combinación ionosférica" (L4), siendo posible obtener una ionosfera inambigua en las estaciones de referencia, en tiempo real.

El punto clave de esta parte radica en el uso del modelo ionosférico para la determinación de la ambigüedad N5. En la figura 2 se presenta la mejora en la determinación de dicha ambigüedad.

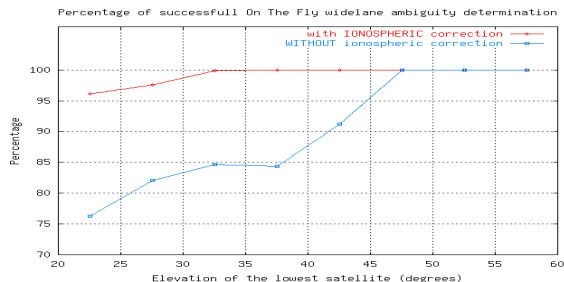


Figura 2 - Porcentaje de éxitos en la determinación de la wide-lane, en función de la elevación.

## 3. RESOLUCION DE LAS AMBIGUIDADES EN EL VEHICULO (NAVEGACION)

### a) Corrección ionosférica

Una vez obtenido el retardo ionosférico inambiguo doblemente diferenciado en las estaciones de referencia es posible interpolar dicho retardo a la posición del vehículo. El error de interpolación debe ser inferior a 2.7cm en L4, para poder garantizar la resolución de las ambigüedades. Para ello, se han considerado dos procedimientos para la interpolación: a) una interpolación lineal de los retardos ionosféricos, b) un esquema de interpolación guiado por el propio modelo, donde la interpolación se realiza sobre la desviación de la predicción del modelo respecto al retardo inambiguo en las estaciones de referencia (que se ha resuelto exactamente). Este segundo procedimiento se ha mostrado muy superior al primero, y es el que se ha implementado en el algoritmo de navegación.

En la figura 3 se muestra para la estación fija BELL (cercana al

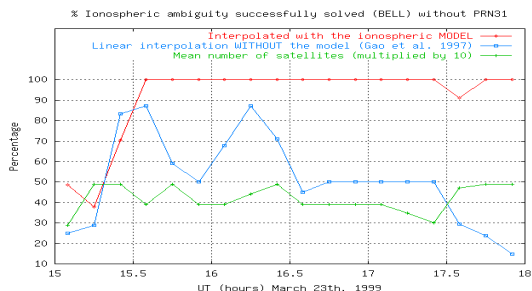


Figura 3 - Porcentaje de éxitos en la determinación de la corrección ionosférica para la estación BELL, con errores <2.7cm, para dos interpoladores ("número medio de satélites" sobre 20° de elevación)

vehículo del experimento y utilizada como estación "test") el porcentaje de éxitos obtenidos en la determinación del retardo ionosférico inambiguo con los dos interpoladores descritos anteriormente.

### b) Resolución de las ambigüedades en L1 y L2

La wide lane doble diferenciada es corregida de la refracción ionosférica con la ionosfera interpolada (I5\_interp) obtenida en el apartado anterior. A continuación son substraídas la combinación libre de ionosfera L3 y su bias B3 de acuerdo con la ecuación (1).

Assumiendo que la corrección ionosférica es suficientemente exacta (<2.7 cm de error en L4), la principal incertidumbre esté en el bias B3. Assumiendo, además, que las principales fuentes de error siguen una distribución normal, entonces el error en el bias B3 debe ser menor que  $\frac{1}{4} \lambda_5$  (<21.5cm) para que el procedimiento funcione bien al menos el 95% del tiempo.

El bias B3 debe ser estimado en el filtro de Kalman simultáneamente con la posición del vehículo. Asimismo, deben estimarse la corrección debida a la troposfera y a la utilización de las efemérides broadcast. Esta solución conjunta ha sido realizada mediante el software desarrollado por el primer autor, descrito en las referencias (Colombo, 1991, 1998a, 1998b), con las adaptaciones pertinentes para aplicar las correcciones ionosféricas.

Al igual que en la sección anterior, conocidas la ambigüedad N5 y la refracción I5\_interp, pueden determinarse el resto de ambigüedades, y en particular N1 y N2.

Habiendo resuelto N1 y N2, se puede calcular el valor exacto del bias B3, el cual puede ser asimilado en el filtro de Kalman como una (pseudo)-observación adicional.

En la figura 4 se muestran las discrepancias (en metros) entre el posicionamiento cinemático OTF para el vehículo relativo a EBRE y la trayectoria de control precisa (relativamente cercana a BELL). El filtro converge después de asimilar 4 ambigüedades O-T-F.

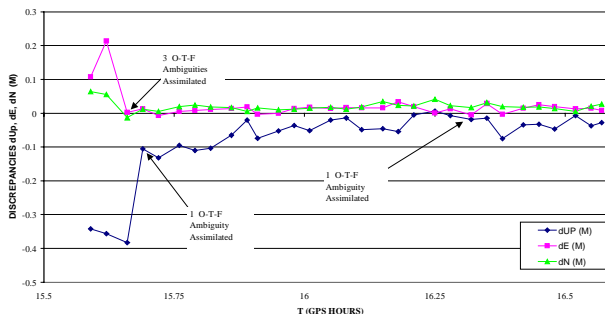


Figura 4 - Discrepancias en el posicionamiento cinemático de un vehículo

El modelo ionosférico ha sido procesado con el software elaborado por gAGE/UPC. La trayectoria del vehículo ha sido calculada mediante el software desarrollado por el primer autor, modificado para implementar el OTF algoritmo descrito en el apartado anterior, y con el GeoTeX:TraDer del ICC.

## 4. REFERENCIAS

Gao, Y., Z. Li and J.F. McLellan (1997): "Carrier Phase Based Regional Area Differential GPS for Decimeter-Level Positioning and Navigation". *Proceedings of the Institute of Navigation, (ION) GPS '97*, pp. 1305-1313.

Hernández-Pajares M., Juan, J.M., J. Sanz and O.L. Colombo (1999): "Precise Ionospheric Determination and Its Application to Real-Time GPS Ambiguity Resolution". *Proceedings ION'99, Nashville, Tennessee* (in press).

Hernández-Pajares M., Juan, J.M., and J. Sanz (1999): "New Approaches in Global Ionospheric Determination Using Ground GPS Data". *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (in press)

Colombo, O.L. (1991): "Errors in Long Distance Kinematic GPS". *Proceedings of the ION GPS '91, Albuquerque*.

Colombo, O.L. (1998a): "Long Range Kinematic GPS, in GPS for Geodesy". *2nd Edition, A. Kleusberg and P. Teunissen, Editors. Springer-Verlag*.

Colombo, O.L. and A.G. Evans (1998b): "Testing Decimeter-Level, Kinematic, Differential GPS Over Great Distances at Sea and on Land". *Proceedings ION GPS '98, Nashville, Tennessee*.

Talaya, J., and E. Bosch (1999): "CATNET: a permanent GPS network with real time capabilities". *Proceedings ION GPS '99, Nashville, Tennessee*.