

## UTILIZACIÓN DE ENLACES DE LATENCIA MEDIA (>5 s) PARA RTK

A. Baron, J. Talaya  
Institut Cartogràfic de Catalunya  
Parc de Montjuïc  
08038 Barcelona

### RESUMEN

Las técnicas de posicionamiento GPS cinemático en tiempo real RTK (Real Time Kinematic) permiten la determinación de la posición con precisión centimétrica. Sin embargo, para su uso son necesarias correcciones diferenciales de fase que, en cualquier caso y aún dependiendo de la calidad de los datos, requieren latencias bajas.

El usuario puede conectarse al proveedor de servicios mediante un enlace GSM de baja latencia (<1s). Sin embargo, es frecuente que los organismos que gestionan las redes de estaciones permanentes GPS opten por el uso de enlaces de bajo coste (VSAT, INTERNET) para acceder a los datos de dichas estaciones GPS. La utilización de sistemas de comunicación como son VSAT o INTERNET para la transmisión de estos datos conllevan de por sí retardos muy sensibles para su uso en aplicaciones de posicionamiento de la fase en tiempo real.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos al aplicar una extrapolación polinomial a partir de unas pocas épocas precedentes de las correcciones diferenciales de fase a emitir. Dicha extrapolación y la posterior corrección de errores atribuibles a los relojes de los satélites, permitirán la generación de correcciones diferenciales de la fase con retardos asumibles por los receptores GPS de los usuarios.

### 1. Introducción

En los últimos años hemos asistido a un fuerte despliegue de redes de estaciones permanentes GPS en diversos países por parte de diferentes organismos cartográficos [1]. Estas redes de estaciones permanentes permiten facilitar las tareas de posicionamiento sobre el territorio a partir de los datos y las correcciones diferenciales que generan. Uno de los posibles servicios ofrecidos por estas redes consiste en la difusión de correcciones diferenciales de fase que permiten un posicionamiento RTK en tiempo real y con una precisión de pocos centímetros.

La principal limitación del posicionamiento RTK consiste en que la distancia a la estación de referencia debe ser menor de 15-20 km para que los retardos atmosféricos que afectan las observaciones GPS del usuario sean eliminados por los retardos atmosféricos observados en la estación de referencia. Durante los últimos años se han desarrollado técnicas para ampliar la validez de las correcciones RTK utilizando redes de estaciones permanentes para modelar los retardos atmosféricos del área cubierta por las estaciones GPS [2], [3]. Dichas técnicas requieren disponer de las observaciones de todas las estaciones permanentes en un servidor para poder proceder a realizar el modelado de los errores que afectan la señal GPS.

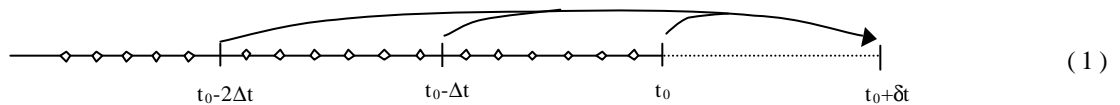
El usuario de servicios RTK que requiera precisiones centimétricas para su posicionamiento deberá recibir las correcciones de fase de la estación de referencia con unos pocos segundos de retardo. Ello conlleva que el proveedor de dichas correcciones deba disponer de enlaces de baja latencia (< 1 segundo) con su red de estaciones permanentes GPS. No obstante, es bastante habitual que los organismos que gestionan dichas redes, apelando a criterios económicos, descarten este tipo de enlaces de baja latencia en favor de otros sistemas de comunicación, como VSAT o Internet, que permiten la transmisión de datos a latencias medias. Los retardos provocados en la transmisión de los datos por este tipo de enlaces pueden resultar insuficientes para ofrecer correcciones de fase en tiempo real que garanticen un posicionamiento de alta precisión.

En los sistemas basados en Internet no se garantiza que la latencia sea constante y baja. De hecho, aunque los datos se transmitan normalmente en menos de un segundo, en momentos de saturación de la red, por incrementos de tráfico de información, los retardos observados en la transmisión de los datos se incrementan notablemente afectando a su posible utilización para técnicas de RTK ampliado. Los sistemas basados en VSAT [4], [5] ofrecen una latencia media de unos pocos segundos (aunque puede reducirse perdiendo rendimiento y aumentando los costes de transmisión).

En los siguientes apartados se pretende estudiar el comportamiento de los errores que afectan la señal GPS y ofrecer una solución para la utilización de las técnicas de RTK ampliado a partir de los datos de estaciones permanentes GPS con enlaces de latencia media (pocos segundos).

## 2. Viabilidad de los enlaces de latencia media para RTK utilizando extrapolación polinomial

El método que en este documento se presenta es la generación de correcciones de fase con latencias menores de 1 segundo a partir de la extrapolación polinomial. Supongamos  $t_0$  sea el último tiempo en el que se han obtenido las observaciones GPS de la estación de referencia y por tanto calculadas las correcciones de fase para los distintos satélites. El método consistiría en utilizar las correcciones en  $t_0$ ,  $t_0-\Delta t$  y  $t_0-2\Delta t$  para realizar una extrapolación polinomial de grado 2 y así obtener la corrección en  $t_0+\delta t$ , siendo  $\delta t$  el retardo necesario para que la corrección sea recibida por el usuario RTK.



### 2.1. Validación teórica

A partir de la ecuación del observable fase se puede analizar la viabilidad del método propuesto:

$$\lambda\Phi_r^s = \rho_r^s + \delta\phi_r^s + c(\delta\alpha^s - \delta\Gamma_r) + \lambda N_r^s - \delta_{ion_r^s} + \delta_{trop_r^s} + \varepsilon \quad (2)$$

donde :

$$\rho_r^s = \sqrt{(X_r - X^s)^2 + (Y_r - Y^s)^2 + (Z_r - Z^s)^2}$$

$\lambda$	Longitud de onda de la portadora
$\Phi_r^s$	Observación de fase
$X_r, Y_r, Z_r$	Coordenadas del receptor
$X^s, Y^s, Z^s$	Coordenadas del satélite
$\delta\phi_r^s$	Error de las efemérides del satélite
$\delta\alpha^s$	Error del reloj del satélite
$\delta\Gamma_r$	Error del reloj del receptor
$N_r^s$	Ambigüedad inicial
$\delta_{ion_r^s}, \delta_{trop_r^s}$	Errores ionosférico y troposférico
$\varepsilon$	Otros errores (multipath, ruido del receptor...)

Fijando el valor de las ambigüedades a un valor arbitrario, las correcciones a enviar al usuario RTK serán:

$$\lambda\Phi_r^s - \rho_r^s - c\delta\Gamma_r - \lambda N_r^s = \delta\phi_r^s - c\delta\alpha^s - \delta_{ion_r^s} + \delta_{trop_r^s} + \varepsilon$$

Al realizar la extrapolación de dichas correcciones, se introducen determinados errores en las correcciones extrapoladas que se generan, resultado de modelizar mediante un polinomio el comportamiento de los diferentes errores o efectos que se intentan corregir ( $\delta\phi_r^s$ ,  $\delta\alpha^s$ ,  $\delta_{ion}$ ,  $\delta_{trop}$ ). Si estudiamos el comportamiento teórico de estos términos, podremos obtener una estimación de la calidad de las correcciones de fase generadas con el método propuesto.

Analicemos pues las dinámicas de los diferentes factores que se intentan corregir para poder estimar que tipo de error estamos introduciendo al extrapolar. La componente del error atribuible a la ionosfera puede presentar variabilidades

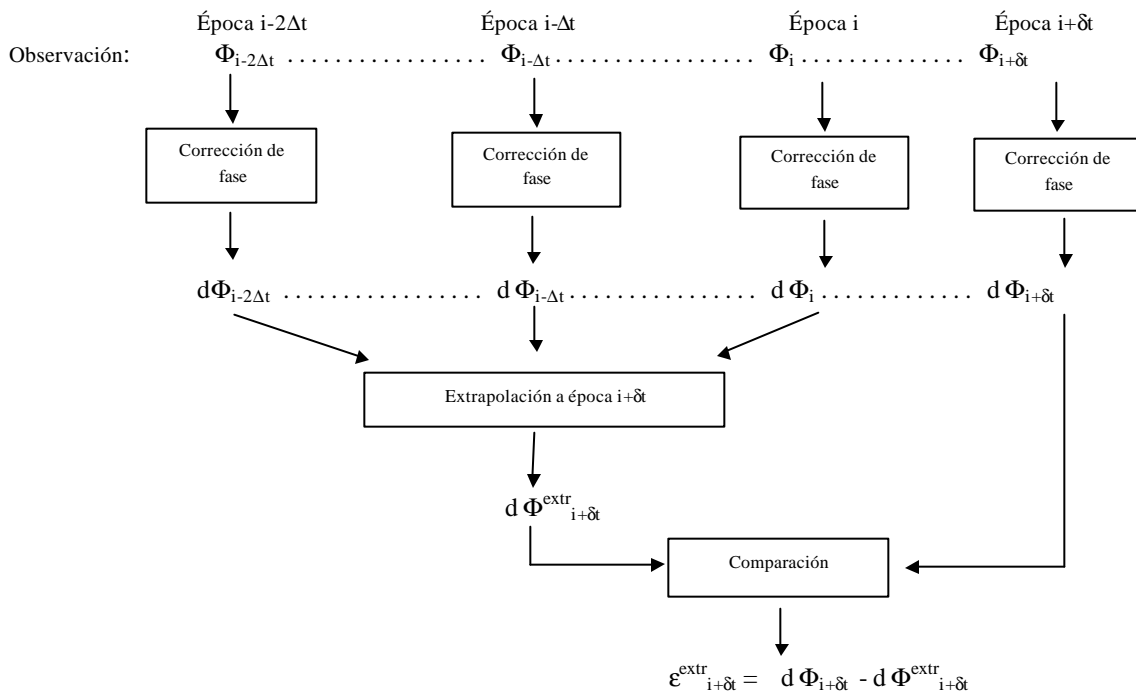
de alta frecuencia (en épocas de turbulencias ionosféricas), de frecuencia mediana (efectos diurnos) o bien de baja frecuencia (el ciclo de 11 años de actividad solar). Dado que la extrapolación se realizará con retardos de entre 5 y 15 segundos, sólo los dos primeros son de nuestro interés. En general, en intervalos de tiempo tan reducidos, el retardo ionosférico presenta muy baja variabilidad, a no ser que se produzcan turbulencias ionosféricas, en cuyo caso incluso el receptor puede llegar a perder la señal. Organismos proveedores de correcciones de fase actualizan los modelos ionosféricos cada 10 segundos aproximadamente. Por lo que respecta al error troposférico, éste tiene una dinámica muy baja, del orden de 1 a 30mm/h [7] [8], lo cual comporta que al extrapolar dicho término con 5-15 segundos de retardo el error introducido será prácticamente despreciable. Por lo que respecta a los errores de las órbitas de los satélites, éstas tienen un comportamiento bastante estable y fácilmente modelable por polinomios, estimándose el error de extrapolación de las órbitas entorno a pocos centímetros por hora [7]. La componente menos modelable debido a las desviaciones aleatorias de sus osciladores y, en consecuencia, la que más errores puede introducir en la extrapolación es el error atribuible al reloj de los satélites.

Teniendo en cuenta que el error introducido al extrapolar los errores de los relojes de los satélites son comunes para cualquier estación permanente GPS, también se ha estudiado la posibilidad de disminuir estos errores de extrapolación a partir de las observaciones obtenidas de otra estación permanente GPS, esta con enlaces a baja latencia. Este método consiste en calcular para dicha estación GPS, al mismo tiempo que sus correcciones de fase, las correcciones extrapoladas, y así poder obtener “on-line” el error atribuible a la extrapolación, el cual estará afectado por el error de los relojes de los satélites en la misma medida que lo está el error de extrapolación de las correcciones generadas en la estación GPS a media latencia, con lo cual podemos eliminar de éstas la parte de error atribuible a los dichos relojes.

## 2.2. Resultados empíricos de los errores de extrapolación

Para estudiar la viabilidad del método de la extrapolación polinomial para la simulación de correcciones de fase, se ha procedido a aplicarlo utilizando datos reales obtenidos en las estaciones permanentes GPS pertenecientes a la red CATNET del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC).

Disponiendo de observaciones de la estación GPS a cada segundo, en cada nueva época recibida se calculan las correcciones de fase para cada satélite. Al mismo tiempo, utilizando un polinomio de segundo grado, se extrapolan a una época posterior y se procede a la comparación de la corrección extrapolada con su valor real. El siguiente gráfico resume el método para las observaciones de un satélite:



Se han realizado pruebas con datos de diferentes estaciones y días. En las figuras 1 y 2 se muestran los errores de las correcciones diferenciales de fase generadas con este método. En estas figuras se han tenido en cuenta retardos en la transmisión de los datos desde la estación permanente GPS hasta el usuario RTK de 6 y 10 segundos respectivamente. El RMS de dichos errores de extrapolación en ambos casos ha sido de 0.003-0.008 m (dependiendo del satélite) para retardos de 6 segundos y 0.006-0.010 m para retardos de 10 segundos.

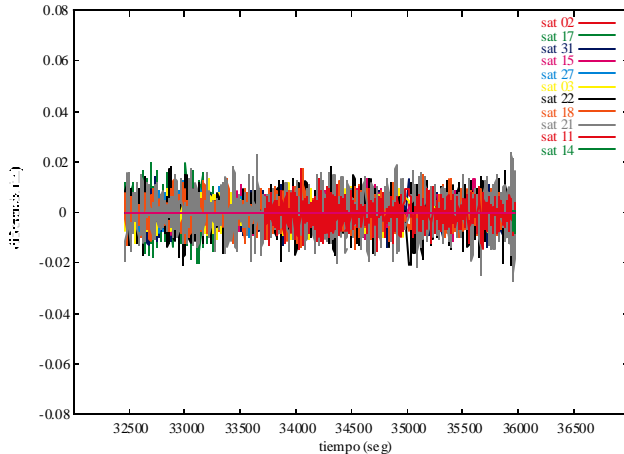


Figura 1: errores de extrapolación para un retardo de 6 segundos en la transmisión de los datos

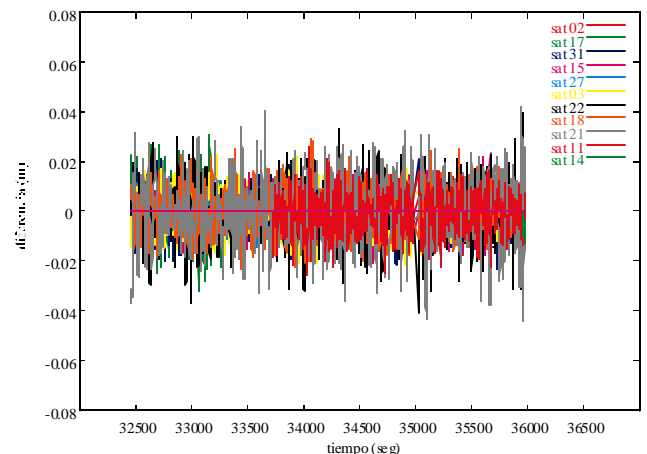


Figura 2: errores de extrapolación para un retardo de 10 segundos en la transmisión de los datos

Para la aplicación de este método se ha utilizado un polinomio de segundo grado. Como que en realidad se están calculando la velocidad y la aceleración de los errores que afectan a la observación GPS, se debe tener en consideración la distancia entre las épocas que intervienen en la construcción del polinomio extrapolador con el fin de minimizar los errores en la determinación de dicha velocidad y aceleración. Así pues, se han realizado distintas pruebas para observar como se comportan los errores de extrapolación en función de la distancia entre épocas escogida para la construcción del polinomio. Los resultados (ver figura 3) indican que, en general, el valor óptimo para reducir los errores de extrapolación es de 20 segundos entre épocas, valor utilizado en la representación de las figuras 1 y 2.

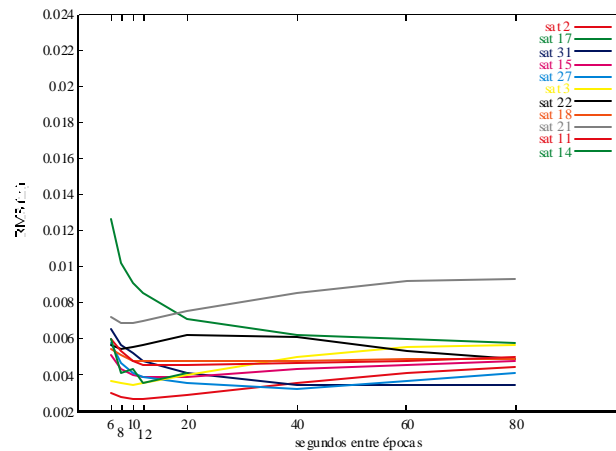


Figura 3: RMS de los errores de extrapolación en función de la distancia entre épocas, para un retardo  $\delta t=6$  segundos

En este gráfico puede observarse la mejoría que supone para la extrapolación la utilización de observaciones distantes entre sí 20 segundos frente a observaciones distantes, por ejemplo, 6 segundos. Es decir, el polinomio resultante al utilizar  $\Delta t=20$  segundos (en 1) se aproxima con más fiabilidad a la función que representan las correcciones de fase

que no el polinomio con  $\Delta t=6$  segundos. Las mejoras del comportamiento de dicho error para ciertos satélites con  $\Delta t$  superiores no son significativas.

Mención aparte merecen el comportamiento de los satélites 17 y 21. El primero presenta RMS bastante elevados para  $\Delta t$  (en 1) pequeños ( $< 20$  segundos) y mejora significativamente para  $\Delta t > 20$  segundos. Ello sin duda es debido a la poca calidad de sus observaciones de fase. Por lo que respecta al satélite 21, podemos observar que el RMS de sus errores de extrapolación es bastante superior al del resto de los satélites. Utilizando el método antes mencionado de eliminar parte de los errores introducidos por los errores de los relojes de los satélites mediante las observaciones de una segunda estación de referencia a baja latencia, más adelante verificaremos que, efectivamente, el elevado RMS que muestra el satélite 21 en la figura 3 es causado por el error de su reloj.

Hemos visto que, en cualquier caso, la aplicación de este método para la generación de correcciones diferenciales de fase con latencias menores de 1 segundo nos permite obtener errores menores al 10% de la longitud de onda del observable fase y por tanto apto para realizar un posicionamiento centimétrico.

### 2.3. Corrección de los errores de relojes de los satélites utilizando datos de estaciones con enlaces de baja latencia

Tal como hemos comprobado en el apartado anterior, el método de correcciones de fase extrapoladas que hemos descrito anteriormente cumple el objetivo de dar soporte a usuarios que requieran alta precisión en posicionamiento. Ahora bien, dicho servicio podría ser optimizado si dentro de la red de estaciones permanentes GPS, al menos una de ellas transmitiera datos a baja latencia. Algunos de los términos que son extrapolados son idénticos para cualesquiera de las estaciones permanentes GPS, como por ejemplo el error de los relojes de los satélites. Así pues, a partir de las observaciones obtenidas de la estación GPS a baja latencia, podemos calcular, a la vez que sus correcciones de fase, las correcciones extrapoladas, pudiendo obtener el error de dicha extrapolación sin ningún tipo de retardo. Este error de extrapolación se aplicaría a su vez en las correcciones que están siendo extrapoladas en las estaciones que tienen enlaces a media latencia, con lo cual se estaría eliminando parte de los errores cometidos al extrapolar, concretamente los comunes a ambas estaciones GPS, es decir, errores de los relojes de los satélites y errores de sus efemérides.

Si en el apartado anterior hemos presentado las diferencias entre correcciones y correcciones extrapoladas para una estación determinada (concretamente EBRE), se ha procedido a realizar los mismos cálculos para la estación de Les Planes en el mismo día e intervalo de tiempo. Comparando dichos resultados, obtendremos el error cometido en la generación de nuestras correcciones en caso de corregir parte del error de extrapolación (concretamente errores de los relojes de los satélites) con los datos de otra estación.

En la figura 4 se ha representado las diferencias en los errores de extrapolación obtenidos en las estaciones de EBRE y PLAN, teniendo en cuenta un retardo en la transmisión de los datos de 6 segundos. El RMS de dichas diferencias es de 0.001-0.004 m, dependiendo del satélite.

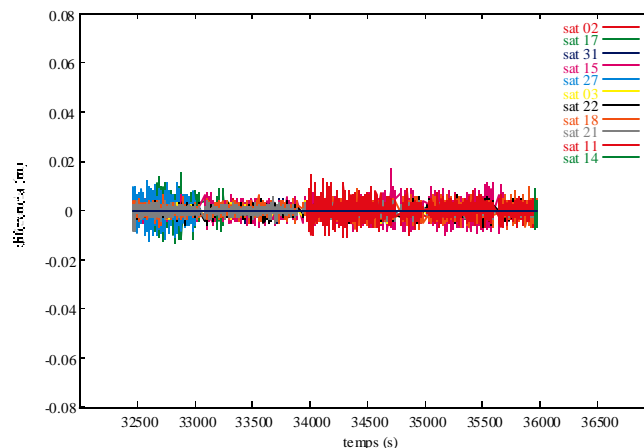


Figura 4: diferencias del error de extrapolación entre EBRE y PLAN, simulando un retardo de  $\delta t=6$  segundos

Comparando estos resultados con los presentados en la figura 1, se observa una clara mejoría en el error cometido al generar las correcciones diferenciales, resultado de eliminar parte de los errores de extrapolación con el uso de esta segunda estación permanente GPS.

En referencia al comportamiento de los errores para el satélite 21, en la figura 3 podía observarse que los errores de extrapolación eran significativamente mayores que para el resto de los satélites. Con la eliminación del error atribuible a su reloj, observamos (ver figura 5) que los errores en sus correcciones pasan a tener valores similares al resto de los satélites. En base a esto podemos deducir que el error de extrapolación del término  $\delta^s$ , considerado en mayor medida en la gráfica 3, era bastante significativo para este satélite 21.

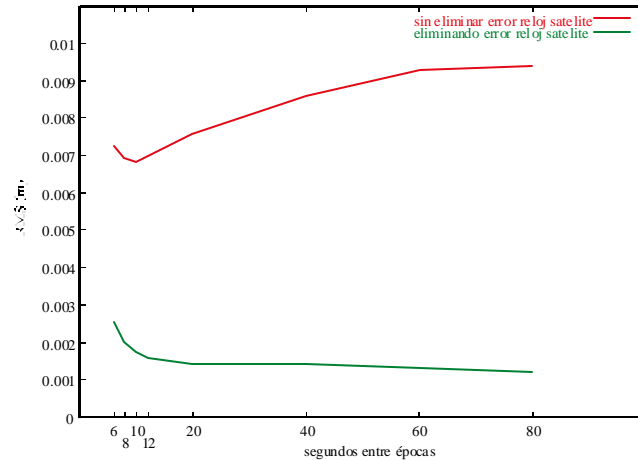


Figura 5: RMS de los errores en las correcciones generadas para el satélite 21 corrigiendo y sin corregir los errores propios de su reloj

Generalizando para el resto de los satélites, observamos igualmente como el uso de una estación GPS adicional cuyos datos son obtenidos a baja latencia mejora significativamente los resultados mostrados en la figura 3. Así pues, generando correcciones diferenciales con retardos de 6 segundos, el usuario RTK recibiría correcciones extrapoladas con errores del orden de 0.002-0.003 m, prácticamente el ruido del propio observable L1.

Los resultados hasta ahora presentados muestran la viabilidad de este método para un posicionamiento centimétrico en tiempo real, en caso de que el retardo en la transmisión de las observaciones desde la estación permanente GPS al centro emisor de las correcciones diferenciales sea de 6 segundos. Si tenemos en cuenta retardos superiores (hasta 20 segundos), los RMS de las correcciones generadas para cada satélite son los presentados en la figura 6.

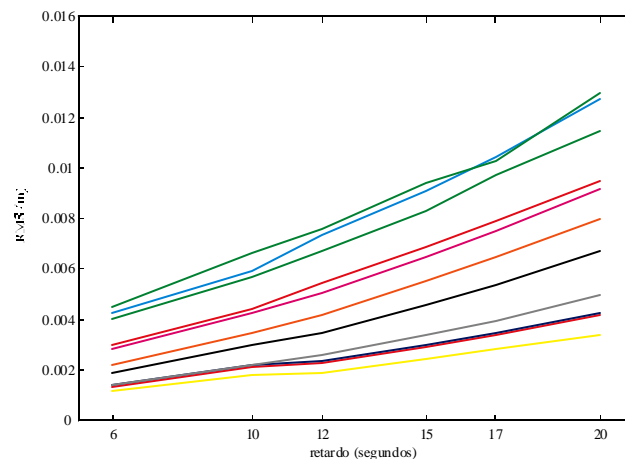


Figura 6: RMS de los errores en la generación de las correcciones diferenciales de fase en función del retardo en la transmisión de los datos

Tal como puede observarse, el error de las correcciones diferenciales de fase a utilizar por el usuario RTK crece considerablemente al aumentar el retardo en la transmisión de las observaciones al centro emisor de las correcciones. Retardos superiores a los 17 segundos provocan la acumulación de errores por encima del centímetro en las correcciones generadas.

#### 2.4. Comportamiento del método con SA conectada

Aunque la disponibilidad selectiva (SA) fue desconectada en el año 2000, los servicios de posicionamiento que ofrece un servicio público no pueden depender de que posibles crisis futuras que requieran una reconexión de la SA inutilicen estos servicios. Se ha aplicado el método aquí expuesto para observaciones GPS obtenidas en épocas con la SA conectada con el fin de comprobar su funcionamiento en estas condiciones.

Recordemos que la SA consiste en la introducción deliberada de errores en los relojes de los satélites (conocido como  $\delta$ -process) y en los parámetros orbitales de los mensajes de navegación ( $\epsilon$ -process). El  $\delta$ -process tiene componentes de alta y baja dinámica, pudiendo alcanzar los primeros variabilidades de 0.3 m/s. El  $\epsilon$ -process, sin embargo exhibe sólo lentas variaciones [6].

Se han escogido los datos de 1 hora de la estación del EBRE correspondiente al día 22-03-2000 y se ha procedido a realizar la extrapolación polinomial de sus correcciones de fase. En la figura 7 podemos observar como el error de extrapolación en esta ocasión es bastante más elevado que para observaciones recogidas en épocas con la SA desconectada (figura 1), consecuencia ello del  $\delta$ -process. El RMS de los errores de las correcciones generadas asumiendo un retardo de 6 segundos es de 0.017-0.031 m. Aplicando la segunda fase del método, es decir, corrigiendo los errores propios de los relojes de los satélites a partir de los datos de una segunda estación GPS con enlaces a baja latencia, obtenemos que el error en la generación de correcciones se ve drásticamente reducido (ver figura 8) situándose su RMS entorno a 0.004- 0.005 m.

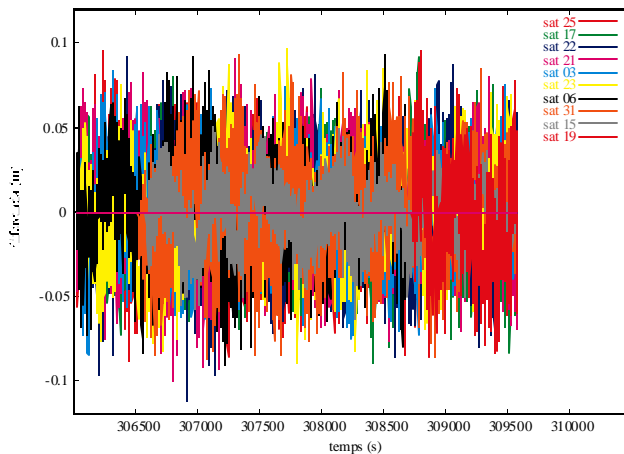


Figura 7: errores de extrapolación para un retardo de 6 segundos en épocas con SA conectada

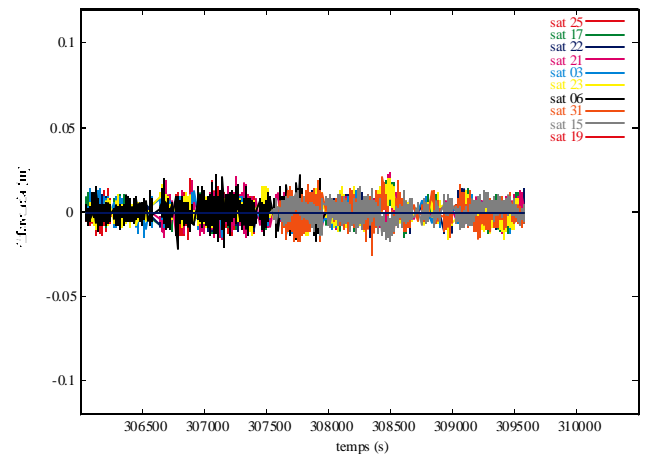


Figura 8: diferencias del error de extrapolación entre EBRE y PLAN, simulando un retardo de  $\delta t=6s$ , con SA conectada

En la gráfica 9 podemos observar que al igual que ocurría en épocas con la SA desconectada, el uso del método para la generación correcciones disponiendo de las observaciones con retardos superiores a 15 segundos no permite un posicionamiento subcentimétrico para los usuarios RTK de las correcciones de fase generadas.

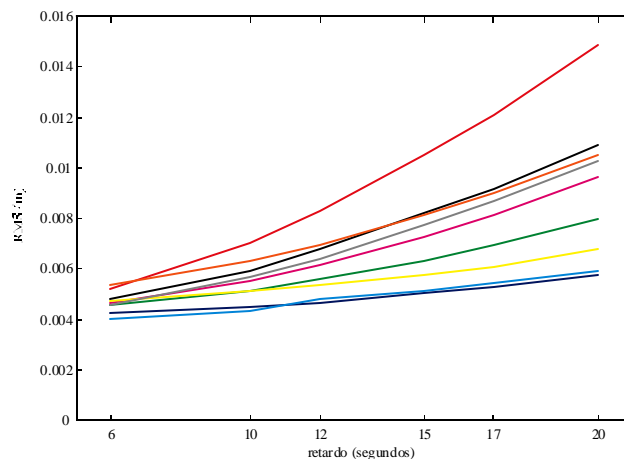


Figura 9: RMS de los errores en la generación de las correcciones diferenciales de fase en función del retardo en la transmisión de los datos

Así pues, aún con SA conectada, el uso de la extrapolación polinomial, soportado por la existencia de una segunda estación GPS con correcciones a tiempo real, permitiría el posicionamiento subcentimétrico requerido por el usuario RTK, siempre y cuando hablemos de retardos en la disponibilidad de las observaciones de las estaciones permanentes menores de 12-15 segundos.

### 3. Conclusiones

Con el objetivo de proveer de correcciones diferenciales de fase en tiempo real a usuarios RTK, los centros proveedores de dichas correcciones pueden optar por disponer de una red de estaciones permanentes GPS conectadas todas ellas al centro transmisor mediante enlaces a baja latencia (con retardos menores de 1 segundo) o bien, tal como hemos demostrado en este documento, pueden también optar por enlaces a media latencia y salvar el retardo que ello conlleva generando las correcciones a transmitir a partir de una simple extrapolación polinomial.

La aplicación de la extrapolación polinomial permite generar correcciones diferenciales con precisiones subcentimétricas si los retardos no superan los 10 segundos y del orden del centímetro en caso de retardos superiores a los 10 segundos.

La utilización de una estación permanente GPS adicional con enlaces a baja latencia, permite eliminar parte de los errores cometidos en la extrapolación, y proveer al usuario con correcciones afectadas por un error subcentimétrico incluso para retardos algo superiores a los 15 segundos.

En épocas con la disponibilidad selectiva (SA) activada, el método es igualmente válido para dar soporte a usuarios RTK, ya que las correcciones generadas no acumulan errores superiores al centímetro en caso de retardos inferiores a los 15 segundos.

### Referencias

- [1]. Parareda,C., Bosch,E., Térmens,A., Ortiz,M.A., Talaya,J., 2003. *CatNet: Servicios de posicionamiento de alta precisión y su integración en las nuevas tecnologías de la información*. 5ª. Setmana Geomàtica de Barcelona "Cartografía, Telemática y Navegación". 11-14.2.2003, Barcelona.
- [2]. Vollath,U., Deking,A., Landau,H., Pagels,C., 2001. *Long-Range RTK Positioning Using Virtual Reference Stations*. International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada.



- [3]. Wanninger,L. 2002: *Virtual Reference Stations for Centimeter-Level Kinematic Positioning*. ION GPS 02, Portland, USA.
- [4]. Talaya,J., Bosch,E., 1999. *CATNET, a permanent GPS network with real-time capabilities*. Proc. ION GPS-99, 12<sup>th</sup> Int. Tech. Meeting of The Satellite Division of The U.S. Institute of Navigation, 14-17 September, Nashville, (Tennessee – EEUU).
- [5]. Jackson,M.E., Meertens,C., Ruud,O., Reeder,S., Gallear,W., Rochen,C., 2002. *Real-Time GPS Data Transmisión Using VSAT Technology*. GPS solutions. Vol. 5, number 4 pp.10 – 19.
- [6]. Georgiadou,Y., Doucet,K.C., 1990. *The Issue of Selective Availability*. GPS World. September-October 1990.
- [7]. Beutler, G. et al., 2000. *GPS Bernese Software Documentation*. Astronomical Institut, University of Berne.
- [8]. Talaya,J., 1995. *Posicionament cinemàtic per aplicacions mediambientals*. 2<sup>a</sup> Semana Geomàtica, 1995, Barcelona.