

RESOLUCIÓN DE AMBIGÜEDADES GPS: TÉCNICAS EMPLEADAS Y ESTUDIOS FUTUROS

Cristina Torrecillas Lozano.
Ingeniera Superior en Cartografía y Geodesia.
Colaboradora Honoraria del Departamento de
Ingeniería Gráfica de la Universidad de Sevilla.

Juan José Martínez García.
Profesor Titular del Departamento de Ingeniería
Gráfica de la Universidad de Sevilla.

(OTF⁴) y en los posicionamientos estáticos en pequeñas áreas (Bases cortas).

Al tratar de comparar varias técnicas, el principal problema que se presenta es que los resultados proporcionados por un procedimiento no son a menudo fácilmente comparables con los que proporcionan los demás, por no mencionar la variedad en las características de los datos o el objetivo de su cálculo. La validación de los resultados es otro tema en el que se debería indagar. Esta validación toma importancia en las técnicas de resoluciones rápidas de la ambigüedad, puesto que una mala resolución llevaría a cometer errores graves de posicionamiento, que pueden suponer costes adicionales en nuevas mediciones...

En la actualidad, el grupo internacional SSG⁵ 1.557 del IAG⁶, establecido desde Julio de 1995 bajo la denominación de "GPS Ambiguity Resolution and Validation", tiene por objetivo la investigación y validación de todos los métodos existentes de resolución de ambigüedades.

Este grupo dispone de una página en Internet en la que es posible ponerse en contacto con los miembros del grupo. La dirección es la siguiente:

[Http://www.geo.tudelft.nl/mgp/people/paul/ssg_1157.html](http://www.geo.tudelft.nl/mgp/people/paul/ssg_1157.html):
Grupo 1.157 IAG.

1. INTRODUCCIÓN

El fin de este artículo es una profundización en lo que se denomina en argot GPS¹, *Resolución de la Ambigüedad*. Ésta, es clave en mediciones GPS cuando se trabaja con técnicas estáticas de corta base o cinemáticas principalmente en tiempo real. La razón estriba en el empleo del observable de la fase de la portadora, afectado éste del término de la *Ambigüedad N*, esto es, por un número desconocido de *completas longitudes de onda que se producen entre el satélite GPS y el receptor*. Esta ambigüedad ha de ser determinada con técnicas de aproximación que exploren al completo el potencial de la precisión de las medidas GPS de la fase portadora, dado que es la naturaleza del número entero lo que garantiza la alta precisión.

La *Resolución de la Ambigüedad* ha sido un tema de actualidad desde los últimos cinco años. Comenzando con simples proyectos, se han impulsado sofisticados procedimientos que priorizan el tiempo que se consume durante el cálculo. Últimamente, han prevalecido aquellos procesos en los que se ha visto que la resolución correcta de la ambigüedad lleva a una mejora en las precisiones de los posicionamientos o a la obtención, en breve tiempo o en tiempo real (métodos de resoluciones rápidas de la *Ambigüedad*²), de las coordenadas de una estación con una calidad centimétrica. Así, la línea de actuación se ha centrado en las herramientas cinemáticas de tiempo real (RTK³), con inicialización para la resolución de las ambigüedades o resolución de éstas en movimiento

2. EL PROBLEMA DE LA RESOLUCIÓN DE LA AMBIGÜEDAD

Desde que W. Gurtner (1.985) demostrara que la fijación de las ambigüedades mejoraba la precisión del posicionamiento de un vértice, han sido múltiples las estrategias que se han seguido para resolver las ambigüedades producidas por la señal GPS. La mejor y más simple posibilidad para determinar la ambigüedad es la adición de frecuencias o señales. Desafortunadamente, el GPS no proporciona más de dos frecuencias, lo que nos obliga a desarrollar estrategias para determinar de otras formas la solución.

- 1 En inglés, Global Positioning System.
- 2 En inglés, FARA, Fast Ambiguity Resolution Approach.
- 3 En inglés, Real Time Kinematic.
- 4 En inglés, On the Fly.
- 5 En inglés, Special Study Group.
- 6 En inglés, International Association of Geodesy.

2.1. REDONDEO AL ENTERO Y ANÁLISIS DE LA MATRIZ VARIANZA-COVARIANZA

Los primeros resultados vinieron de la mano de la aproximación de una solución inicial al número entero más cercano, eliminando de esta manera las incógnitas del sistema de ecuaciones propuesto. Esto solo era posible si las incertidumbres en torno al número de la ambigüedad era menor que media longitud de onda. Realmente solo dio buenos resultados en los casos geodésicos, donde la ambigüedad se trataba en segundo plano.

El siguiente paso vino del análisis de la matriz varianza-covarianza del sistema de ecuaciones planteado y resuelto por la técnica de los mínimos cuadrados. Fue entonces cuando se comenzó a ver y estudiar en mayor profundidad el problema geométrico de la constelación de los satélites GPS como influencia fundamental en la resolución. Los estudios que se llevaron a cabo sobre dicha geometría empezaron en Suiza (1988). En esta investigación se demostró que la determinación de la ambigüedad se resolvía satisfactoriamente con menos de un cuarto de hora de observaciones para cualquier geometría.

2.2. METODOS DE FIJACIÓN SECUENCIAL. TÉCNICAS ESPECIALES

Entonces se trató de ver el impacto que producía la fijación de una ambigüedad sobre el resto de ambigüedades que formaban parte del sistema en una resolución secuencial del mismo. En estas técnicas, tan pronto como la precisión particular de una ambigüedad tenía unos valores deseados, se trataba como si fuera conocida en cálculos posteriores. A las observaciones de Suiza se les aplicó esta práctica, fijando las ambigüedades cuando su precisión formal pertenecía a los 30 mm (correspondiente a un 15% de los 19 cm de la longitud de onda $L1^7$), pudiéndose demostrar que diez minutos de observación en dicha frecuencia bastaban para resolver las ambigüedades bajo una constelación de cinco satélites. El empleo de datos procedentes de la L2 mejoró la ejecución en un factor de $\sqrt{2}$, debido a la duplicidad de los datos, además también se introdujo como herramienta de análisis la aplicación del filtro de Kalman⁸.

Sabiendo que la geometría de los satélites es el factor más importante para conseguir una fiable y rápida resolución de la ambigüedad en bases cortas, quedaba por ver los resultados que se podrían obtener cuando la constelación GPS estuviera completa. Suponiendo ocho satélites, se calculó que con dos o tres minutos de datos procedentes de la L1 y L2 serían suficientes para resolver las ambigüedades usando un umbral de 30 mm. Sin embargo, esto suponía demasiados satélites, que por entonces no estaban disponibles.

En aquellos momentos se reconoció que las estrategias desarrolladas hasta entonces no eran las más óptimas para la

información que se disponía. Se propuso entonces crear una estrategia que explotara al máximo dicha información. Así se vio una salida con la fijación secuencial de ambigüedades, pero en este caso a números enteros, demostrándose que con dos o tres minutos de medición era posible resolver para la mayoría de las constelaciones de satélites existentes entonces.

Puesto que la habilidad para resolver ambigüedades era una función de la geometría, se introdujo la siguiente pregunta: ¿Es posible mejorar el método empleando técnicas de observación especiales?. Esta idea fue desarrollada por B. Remondi (1988), el cual propuso un sistema basado en la reocupación del mismo lugar dos o más veces dentro del espacio temporal de una o dos horas por unos pocos minutos, puesto que, en realidad, se consigue una información de la misma calidad que permaneciendo en él durante igual periodo.

Una reducción en el tiempo de ocupación conduce a una disminución en las precisiones de los parámetros a determinar (ambigüedad y coordenadas). Esto complica la resolución de la ambigüedad en el sentido de que un mayor número de combinaciones diferentes de cifras han de ser analizadas para seleccionar las correctas y fijarlas. Con el número de combinaciones a analizar crece también el tiempo de cálculo que emplea el ordenador. La correcta solución debía ser seleccionada basándose en criterios objetivos. Además se debía incluir un proceso de validación, que indicará si la información disponible en ese momento es suficiente o, si por el contrario, se necesita información adicional para obtener una resolución satisfactoria.

Antes de dar solución a estos problemas, las técnicas se reforzaron con una serie de restricciones. Pueden distinguirse cuatro: la geometría instantánea de los satélites (debía tener buenos valores de DOP⁹), el cambio de dicha geometría, establecimiento de bases cortas (para desestimar los retardos atmosféricos y errores orbitales) y la definición de las ambigüedades como números enteros. Bajo estos condicionantes, la resolución de las observaciones mejoraba considerablemente.

Resumiendo, los estudios iniciales demostraron que un análisis adicional de la matriz varianza-covarianza era necesario para obtener algoritmos eficaces. Esta estrategia general de búsqueda requería, en el peor de los casos, una preocupación por el tiempo de cálculo empleado, siendo la principal ventaja su fiabilidad. Todas las combinaciones de valores enteros para las ambigüedades, dentro de unos rangos específicos, debían de ser evaluadas en términos de resultados a posteriori de la varianza de peso unidad.

2.3. MÉTODOS DE BÚSQUEDA. TÉCNICAS FARA

Los estudios que se sucedieron trataron de dar respuesta a dos cuestiones. Por un lado, de qué manera se podía emplear la información que facilitaba la matriz varianza-covarianza para acelerar el proceso de cálculo y, por otro lado, qué clase

7 Señal portadora de información GPS, perteneciente a la banda de radiofrecuencia L. Existe también la L2.

8 Técnica empleada para predecir posicionamientos.

9 En Inglés Dilution of precision.

de test podría realizarse para crear una selección objetiva y un criterio de validación que garantizaran una resolución de confianza.

La primera cuestión se resolvió con las **técnicas generales de búsqueda**. En ellas se analiza cada punto perteneciente a una malla integrada dentro de una figura n-dimensional (generalmente paralelogramo) centrado en la solución inicial, y cuyo tamaño es dado por las varianzas del primer ajuste con valores reales de las ambigüedades. La dimensión de esta figura es determinada por un único factor obtenido a través de consideraciones estadísticas, teniendo en cuenta el deseado nivel de confianza. En realidad, debido a las correlaciones existentes entre los parámetros estimados, la región de búsqueda es mayor de la deseada, trayendo como consecuencia un mayor número de combinaciones de las que teóricamente se requieren, por lo que siguiendo la teoría de ajuste, se reducirá la superficie a un hiperelipsoide n-dimensional.

Los ejes de la figura se definen por unos rangos de confianza obtenidos de la matriz varianza-covarianza. Sólo las combinaciones enteras de ambigüedades que sean compatibles con dichos rangos son seleccionadas para determinaciones de su varianza de peso unidad.

Siguiendo esta táctica se comprobó, en el año 1.989, que para aplicaciones de simples o multi-ocupaciones con datos de L1 y L2 y de 4 a 5 satélites, es posible resolver las ambigüedades de bases de hasta 10 km. con dos minutos de observación; si se dispone únicamente de datos procedentes de la L1 en las mismas condiciones, el tiempo se incrementaba a los ocho o diez minutos.

Los estudios continuaron con la aplicación de hipótesis estadísticas que decidieran qué conjunto de ambigüedades enteras era la correcta. Los denominados test de χ^2 y de Fisher o *F* fueron los idóneos para estas decisiones.

Procedimientos especiales se añadieron a esta técnica con el objetivo de manejar datos de doble frecuencia y optimizar el camino de búsqueda. A estas técnicas se las denominó **Métodos de la resolución rápida de la ambigüedad**, conocido vulgarmente como FARA¹⁰. Su empleo implica que un minuto de observación en ambas bandas es suficiente para resolver las ambigüedades, obteniendo además una precisión subcentimétrica en posicionamientos simples. Ésta es la razón por la que los receptores usuales GPS adquirieron la segunda frecuencia.

La campaña realizada en la primavera del 90, denominada "FARA 90" tuvo por objetivo probar estas técnicas en diversas situaciones. De hecho, se verificó que, en ocasiones especiales, en las que una buena geometría de la constelación GPS y seis o más satélites disponibles, en observaciones de frecuencia dual, era posible resolver la ambigüedad en tiempos inferiores al minuto, rozando incluso los 15 segundos.

Lo más reciente que se ha estudiado es la resolución de ambigüedades en el aire (OTF¹¹), cuyo fin es evitar la necesi-

dad de realizar, en los métodos de posicionamientos estático-rápido, la resolución inicial de la ambigüedad, que obliga a realizar un posicionamiento estático antes de pasar a modo cinemático. Su filosofía es que en un área pequeña se mantiene la misma constelación de satélites y por tanto, las ambigüedades permanecen constantes en el tiempo, facilitándose así la ejecución de técnicas móviles.

La situación ideal era el procesamiento en tiempo real, pero varios inconvenientes se presentaron debido a la necesidad de análisis y computación de datos en un tiempo análogo. Estos inconvenientes actualmente han sido resueltos mediante el envío de datos, vía módem, entre las estaciones implicadas y el cálculo in situ gracias a la maniobrabilidad del hardware existente.

3. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE RESOLUCIÓN DE AMBIGÜEDADES

Efectuar una clasificación de los métodos de resolución de la ambigüedad es difícil. La dificultad estriba en que continuamente se están produciendo nuevos desarrollos, que introducen innovaciones y mejoras.

Para *cortas distancias*, con técnicas de observación pseudostáticas o pseudocinemáticas, Stop and Go, estático-rápido y cinemático, los métodos que se suelen desarrollar se basan en la búsqueda de la ambigüedad, bien arbitrariamente, bien con restricciones a enteros, despreciando los errores atmosféricos incluyéndolos en los residuales del sistema de ecuaciones. Las técnicas de resolución rápida de la ambigüedad son empleadas en este tipo de distancias. En *distancias medias* se recurre a ajustes secuenciales con el empleo de combinaciones de frecuencias (banda ancha, banda estrecha y combinación libre de Ionosfera). Y para *distancias largas*, de carácter geodésico, las ambigüedades dejan de tener su importancia debido a la gran influencia atmosférica que hacen que cada vez sea más y más difícil resolverlas, quedando en segundo plano y resolviéndose como números enteros.

A grandes rasgos, una primera división se podría centrar en los datos de entrada. Según ésta, los métodos se dividirían en:

- Métodos que emplean una sola frecuencia.
- Métodos que emplean ambas frecuencias: dentro de estas técnicas se mencionan las resoluciones que emplean la banda ancha, la banda estrecha o la combinación libre de ionosfera.
- Empleo de portadoras y códigos sobre las dos frecuencias.

Análogamente se podría hablar de otra clasificación que se centrara en los tipos de técnicas para fijar las ambigüedades, así se tendría:

- Técnicas de redondeo del valor real al entero más próximo.

10 En inglés, Fast Ambiguity Resolution Approach.

11 En inglés, On the fly.

- Técnicas de empleo de criterios de desviaciones típicas para fijar la ambigüedad al entero más cercano.
- Técnicas de búsqueda general: estas metodologías suelen definir unos intervalos de búsqueda para cada ambigüedad y suelen realizar todas las combinaciones numéricas posibles.
- Técnicas de fijación secuencial: basándose en resultados estadísticos, se van fijando en ajustes secuenciales las ambigüedades que se encuentran por debajo de un umbral estadístico.

Este último tipo de clasificación centrada en la técnica de resolución fue desarrollada por Seeber (1.993). Durante un tiempo predominó esta división, pero para los más recientes métodos se ha quedado corta. Esta distribución contenía métodos geométricos, métodos de combinaciones de medidas de código y fase, de búsqueda de la ambigüedad y de combinaciones posibles de estos:

- El *método geométrico* hace uso de la variación dependiente del tiempo de la relación geométrica entre el satélite y el receptor. La técnica funciona si el cambio de geometría es suficientemente amplio (p.e. un largo periodo de observación). La figura 1 muestra gráficamente la interpretación de este método. Inicialmente, la estimación de ambigüedades se realiza como números reales, tratándolos como incógnitas en un ajuste inicial (solución libre de la ambigüedad¹²). Éstos pueden ser, unidos o fijados a números enteros (solución fijada de la ambigüedad¹³) si la estimación de sus valores son muy cercanos a un número de este tipo o, en otras palabras, si el error relativo de posicionamiento en la dirección del satélite es menor que medio ciclo de longitud. En la literatura este método es ampliamente tratado, particularmente Remondi (1.984) desarrolla por primera vez el método de la *Función de la Ambigüedad*. La idea es tomar como observables las simples diferencias entre dos estaciones (A y B) donde las coordenadas de una de ellas es tomada como conocida (A). Las incógnitas son las coordenadas de la segunda estación (B) y la diferencia de errores en el reloj del receptor. El algoritmo de búsqueda varía el vector de la base hasta que la computación de la simple diferencia se asemeja lo mejor con la simple diferencia observada. Se han desarrollado posteriores variaciones de este método (Ver figura 2).

- La segunda aproximación a la solución de la ambigüedad es la combinación de las observaciones derivadas del código y de la fase de portadora. Las medidas de código no emplean la ambigüedad, siendo usadas como una adicional longitud de onda para resolver la ambigüedad de la fase de la portadora. Este método es independiente de la geometría, de los relojes del satélite y receptor y del retardo ionosférico.

- Los *Métodos de búsqueda* de la ambigüedad han sido desarrollados con el objetivo de reducir el tiempo de observación en posicionamientos simples de una estación. La idea básica es buscar la óptima combinación de ambigüedades comen-

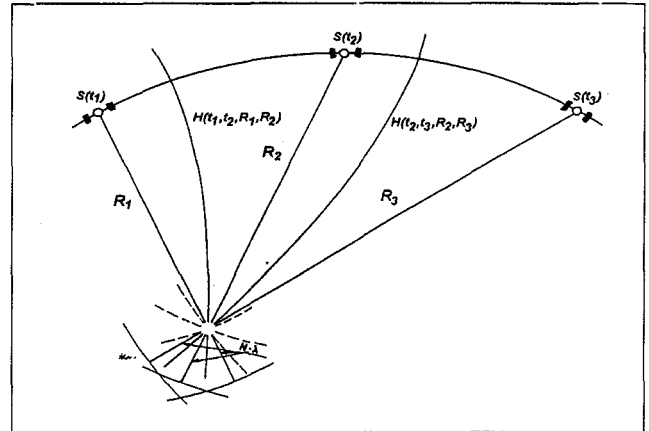


Figura 1: Método geométrico de resolución de ambigüedades.

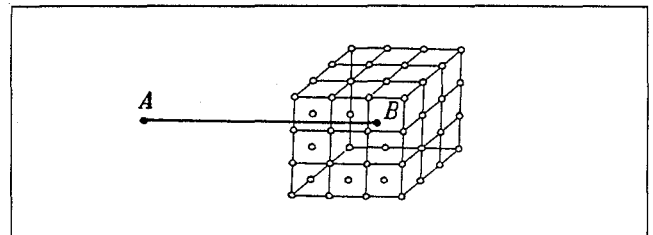


Figura 2: Función Ambigüedad.

zando con un valor inicial que suele ser el de la solución real y, entonces, se restringe el vector solución a valores discretos enteros mediante técnicas de optimización. Las posibles combinaciones definidas dentro del "espacio de la ambigüedad" son examinadas. El problema básico es que el número de operaciones matemáticas necesarias se incrementa rápidamente. Resulta evidente, que el problema no se resuelve examinando todas las combinaciones, por lo que se deben aplicar estrategias de selección. Existen varias propuestas, como por ejemplo la resolución rápida aproximada de la ambigüedad o FARA¹⁴ (Frei, 1.990).

- Por último, se habla de los *métodos combinados*, que incluyen una combinación de todos los métodos mencionados arriba, y que, por tanto, deberían proporcionar los mejores resultados. Su filosofía se basa en que cada fijación de la ambigüedad mejora y estabiliza la solución en la iteración siguiente. Esto no es sólo verdad para la resolución de ambigüedades individuales, sino también para la fijación de combinaciones lineales de números enteros de diferentes ambigüedades.

3.1. CLASIFICACIÓN DE HAN Y RIZOS

Para las técnicas de resolución de la ambigüedad desarrolladas en la última década se puede emplear la clasificación

12 En inglés, Ambiguity float solution, a esta ambigüedad también se la denomina flotante o libre.

13 En inglés, Ambiguity fixed solution.

14 En inglés, Fast Ambiguity Resolution Approach.

de S. Han y C. Rizos (1.997), dividida en seis tipos de resoluciones:

1. Técnicas que emplean métodos operacionales especiales: requieren por parte del usuario una actividad especial de posicionamiento. Entre estas actividades especiales está:
 - El intercambio de antenas: la cual elimina de las ecuaciones de la portadora la ambigüedad. Emplea las restricciones de la geometría instantánea de la constelación y de las bases cortas.
 - Stop and Go: emplea otra técnica inicial para determinar la ambigüedad inicial (puede emplearse el intercambio de antenas). Posteriormente se pasa a realizar medidas cinemáticas. El cambio entre estaciones se realiza manteniendo la constelación.
 - Reocupación, pseudoestático o pseudocinemático: requiere el reocupamiento de una base con intervalos superiores a la media hora. Se emplea la estimación entera de la ambigüedad, la restricción de base corta y de cambio de constelación.
 - Posicionamiento simple relativo de un receptor en un lugar de coordenadas conocidas: la condición más importante es la de cambio de geometría de los satélites. Emplea un receptor fijo al que se referencia uno móvil, manteniendo entre ambos receptores distancias cortas.
2. Búsqueda de la ambigüedad en el dominio de las observaciones: Se incluyen aquí las técnicas de combinaciones de bandas (banda ancha, estrecha, extra-ancha, libre de efecto ionosférico...). Las condiciones fundamentales hacen referencia a las distancias cortas y estimación entera de la ambigüedad. Por lo general, utilizan datos de la portadora, pero también suelen ir asistidas por resoluciones de ambigüedades iniciales con los datos de pseudodistancias (empleado para bases más largas).
3. Búsqueda de la ambigüedad en el dominio de las coordenadas: entre ellas destaca la Función Ambigüedad. Dependen de la geometría de los satélites y por tanto emplean los constreñimientos de geometría instantánea y de cambio de la misma, pero además, emplean también los dos restantes. Estas técnicas son insensibles a las magnitudes de las ambigüedades enteras o a los saltos de ciclo¹⁵
4. Búsqueda de la ambigüedad en el dominio de la ambigüedad estimada: Emplean los valores reales y su matriz varianza-covarianza. Se desarrollan en tres pasos. En primer lugar, la resolución de las ambigüedades por Mínimos Cuadrados como números reales. En segundo lugar, la búsqueda de los valores enteros de dichas ambigüedades y, en último lugar, la validación de los valores adoptados. Las condiciones que emplean suelen ser todas para las

aplicaciones en bases cortas, eliminando la restricción de bases cortas para las aplicaciones a largas bases. Dada la correlación existente entre las ambigüedades, estas suelen ser decorreladas con descomposiciones LDL^T o Cholesky. Técnicas como las FARA, LSAST¹⁶, FAST¹⁷ o el método LAMBDA¹⁸. También suele tener aplicación a técnicas de determinación de altitudes. La figura 3 compara varias de estas técnicas con el empleo de la decorrelación que da lugar a la transformación de ambigüedades.

5. Técnicas de mejora de la ambigüedad: se emplean para re-estimar los parámetros de la ambigüedad cuando existen saltos de ciclo y sólo se han tomado unos pocos minutos de datos. Realmente, es un problema de determinación de saltos de ciclo. Es adecuada para posicionamientos cinemáticos lejanos en postprocesado de datos o tiempo real. Requiere de inicialización de la ambigüedad. Emplea todas las condiciones, suprimiendo las de base corta para las largas distancias.
6. Técnicas combinadas: hacen referencia a la combinación de varios de estos métodos como podría ser la maximización de la función ambigüedad con la minimización de las formas cuadradas de los residuos. Aquí se englobarían las técnicas de instantánea resolución de la ambigüedad que no emplean el condicionamiento de la geometría de la constelación. También se incluirían aquí la introducción de otro tipos de sensores como podrían ser los inerciales. Estos tipos de sensores físicos asisten a la mejora de la estimación entera de la ambigüedad si se pierde la señal a los satélites por parte de nuestro receptor GPS. El principal inconveniente es el precio de estos sistemas.

Las técnicas 2, 3 y 4 se podrían integrar en una sola, tomando las características más positivas de cada una, realizando la resolución de ambigüedades más fiable. Sin embargo, debido a un menor grado de libertad, el control de calidad se convierte en una parte muy relevante.

MÉTODOS DE BÚSQUEDA	BÚSQUEDA DE AMB. ORIGINALES (L1)		BÚSQUEDA DE AMB. TRANSFORMADAS (L1)		BÚSQUEDA DE AMB. ORIGINALES (L1 Y L2)		BÚSQUEDA DE AMB. TRANSFORMADAS (L1 Y L2)	
	Nº Cálculos	Tiempo (seg)	Nº Cálculos	Tiempo (mseg)	Nº Cálculos	Tiempo (seg)	Nº Cálculos	Tiempo (mseg)
FARA	24095934	1195,46	1051	35,37	788	2,08	88	9,45
LSAST	83720	2,91	N/A	N/A	370175	28,29	N/A	N/A
Cholesky	6.85*10 ⁴	3,41	2250	4,23	5.55*10 ¹²	5,22	1296	6,68
FASF	24637	1,15	1908	60,20	85227	7,90	624	44,98
LDL ^T	978	1,54	977	49,76	10	0,27	10	4,34

N/A: no aplicable
 mseg.: milisegundos
 Resultados sobre un ordenador 486-100 MHz.

Figura 3: Comparación de diferentes métodos de búsqueda con ambigüedades originales y transformadas (S. Han, 1.997).

15 En inglés, Cycle Slip, representa una pérdida de la señal.
 16 En inglés, Least-Squares Ambiguity Search Technique.
 17 En inglés, Fast Ambiguity Search Filter.
 18 En inglés, Least-square AMBguity Decorrelation Adjustment.

4. CONCLUSIONES

La resolución de ambigüedades es un factor clave para las medidas GPS de precisión. Los investigadores de las tecnologías GPS han derivado multitud de técnicas para la resolución de la ambigüedad, con su serie de ventajas, desventajas y optimizaciones para situaciones específicas.

Las técnicas que se basan en el empleo de métodos de observación especiales (intercambio de antenas, pseudocinemático...) son más robustas, pero también es verdad que sus aplicaciones están muy restringidas.

Las técnicas de búsqueda, en cualquiera de los dominios comentados, poseen un amplio rango de aplicaciones, sin embargo, al depender de un modelo estocástico, la presencia de fuentes de error tales como los retardos o la multitraectoria complican el modelo y su precisión.

Extendiendo el tiempo de observación en una estación a horas e incluso días, la solución real de la ambigüedad proporciona resultados excelentes, incluso en grandes distancias entre estaciones, sin la necesidad de resolver las ambigüedades enteras.

Con las técnicas de resolución instantánea de la ambigüedad no es posible resolver las ambigüedades con una época, dada la necesidad de un cambio mínimo de geometría. Además, si sólo se dispone de la frecuencia L1 se necesitarán unos 2 o 3 minutos para resolver las ambigüedades con seis satélites disponibles. Las resoluciones con frecuencia doble dan mejores resultados que las combinaciones libres de geometría. Con ella y 15 segundos de observación es posible resolver el problema.

Está en estudio la adición de una segunda frecuencia civil en la próxima generación de satélites GPS, que vendría modulada preferiblemente por una banda ancha con un código de corta secuencia al estilo del código C/A. La elección de la frecuencia de esta nueva señal es complicada y actualmente está en discusión. La presencia de esta nueva señal civil permitiría una resolución eficiente de la ambigüedad sin el coste extra de los receptores de frecuencia L2.

La aparición de métodos que combinen las constelaciones Glonass y GPS introducirán un cambio en las técnicas, sirviendo para mejorar los valores hallados para las ambigüedades al aumentar el número de observables.

5. ESTUDIOS FUTUROS

Las técnicas de resolución de la ambigüedad no dejan de ser mejoradas. Entre los estudios que se están realizando en la actualidad destaca el que llevan las compañías alemanas

Terrasat GmgH y Socratec GmbH por encargo de la Agencia Espacial Europea (ESA¹⁹) bajo la denominación de estudio TCAR y subtítulo "Precise Relative Positioning using GNSS²⁰ Three-Carrier Ambiguity Resolution". El estudio tiene fecha de entrega para Agosto de 1.998 y trata de estudiar una técnica especial de resolución de la ambigüedad de la fase portadora en el aire para la segunda generación de la GNSS que facilite el posicionamiento en tiempo real con precisión del nivel centimétrico. Teóricamente, el empleo de tres portadoras debe reducir el número de posibles candidatos a uno sólo.

S. Han (1.996a) propone una nueva técnica para la resolución instantánea de la ambigüedad denominado *método integrado para resoluciones instantáneas de la ambigüedad* para su empleo en tiempo real. Necesita datos de doble frecuencia con observaciones de código y fase. El algoritmo combina los procedimientos de búsqueda en el dominio de las ambigüedades, de la observación y de las ambigüedades estimadas. El procedimiento presenta tres mejoras con respecto a los convencionales:

1. Mejora del modelo estocástico para dobles diferencias en tiempo real.
2. Refinamiento del criterio que se emplea para distinguir el conjunto de valores enteros óptimos para las ambigüedades, el cual define la mínima forma cuadrática de residuales, del segundo mejor conjunto.
3. Desarrollo de un procedimiento de adaptación y detección de faltas.

Otra técnica innovadora es la que propone Christopher Macabiau denominado MAPAS²¹ como mejora de la propuesta LSAST²².

BIBLIOGRAFÍA

Se ha de citar la carencia de material de estudio en español o inglés que trate el tema de la resolución de la ambigüedad, de hecho, se puede hacer referencia a unas palabras textuales de uno de los grandes investigadores en la materia, Erwin Frei, en el prologo de su Tesis Doctoral, que traducidas dicen "Sorprendentemente, ha sido duro encontrar literatura que abarcara con detalle el análisis de la resolución de la ambigüedad y los factores para su determinación". Afortunadamente, en la actualidad se puede contar con una gran ayuda, Internet y su correo electrónico, sin ayuda de los cuales pensar en la realización de este tipo de investigación quizá hubiera supuesto una mayor dedicación de tiempo.

Abidin, H.Z. (1.994) On-the-fly ambiguity resolution. GPS World, abril 1.994, p. 40-50.

19 En inglés, European Space Agency.

20 GPS y GLONASS simultáneamente.

21 No se tiene conocimiento del significado de estas siglas.

22 En inglés, Common ambiguity resolution method using Least Squared Residuals Theory.