



Treball Fi de Carrera

Enginyeria Tècnica de Telecomunicació
Especialitat en Sistemes Electrònics

Experimentació amb un receptor software
GPS/GALILEO d'alta sensibilitat per a entorns interiors

Juan Manuel Parro Jiménez

Director: José Antonio López-Salcedo

Departament de Telecomunicació i Enginyeria de Sistemes

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE)
Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)

Juliol 2009



El tribunal d'avaluació d'aquest Treball Fi de Carrera, reunit el dia *29 de juny de 2009*, ha acordat concedir la següent qualificació:

A large, empty rectangular box with a thin black border, occupying most of the page below the text.

Tribunal: *Joan García García*

José A. López Salcedo

Gonzalo Seco Granados



El sotasingnant, *José Antonio López Salcedo*, Professor de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE) de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB),

CERTIFICA:

Que el treball presentat en aquesta memòria de Treball Fi de Carrera ha estat realitzat sota la seva direcció per l'alumne *Juan Manuel Parro Jiménez*.

I, perquè consti a tots els efectes, signa el present certificat.

Bellaterra, 25 de maig de 2009.

Signatura: *José Antonio López Salcedo*

Experimentación con un receptor software
GPS/GALILEO de alta sensibilidad para entornos
interiores

Juan Manuel Parro Jiménez

Junio de 2009, Bellaterra

Quiero agradecer a José A. López Salcedo, el haberme dado la oportunidad de trabajar en un campo tan interesante como lo es la navegación por satélite. Así como decirles a mi familia y a Míriam, que espero devolverles algún día el apoyo que me han dado durante este año.

"porque el corazón del hombre necesita creer algo, y cree mentiras cuando no encuentra verdades que creer" *Mariano José de Larra*

Índice

1.	Introducción	8
1.1	Motivación del Proyecto	8
1.2	Descripción del proyecto.....	8
2.	Fundamentos del sistema GPS.....	10
2.1	Introducción a GPS	10
2.2	Cálculo de la Posición	11
2.3	La señal GPS.....	13
2.4	Ensanchado del espectro de la señal GPS	14
2.4.1	Sistema de modulación	14
2.5	Los códigos C/A	16
2.5.1	Generador de secuencias Gold	17
2.6	Bits de navegación:	18
3.	El receptor GPS.....	20
3.1	Adquisición	21
3.1.1	Integración coherente/no-coherente	23
3.2	Identificación de Paquetes	27
4.	Escenarios Indoor	28
4.1	Atenuación de la señal GPS	28
4.2	A-GPS	29
4.3	Multipath.....	30
4.3.1	Modelado del canal con multipath	32

5.	Método para la detección de Multipath	36
5.1	Fundamentos para el cálculo de SAM.....	36
5.1.1	Cálculo de SAM.....	37
5.2	Características de la métrica SAM.....	39
5.3	Correlación de las muestras de SAM.....	41
5.4	Clasificación de situaciones con multipath	42
5.5	Simulación con MATLAB del cálculo de SAM	43
5.5.1	Caso ideal sin multipath ni ruido.....	44
5.5.2	Caso ideal con multipath y sin ruido	45
5.5.3	Caso real con ruido y sin multipath.....	46
5.5.4	Caso real con multipath y ruido	47
5.5.5	Caso real con multipath aleatorio y ruido.....	48
6.	Medidas Experimentales	50
6.1	Set-up	50
6.2	Medidas experimentales	51
6.2.1	Escenario: Ventana Laboratorio.....	51
	Satélite 2:.....	55
	Satélite 4:.....	57
	Satélite 7:.....	60
	Satélite 8:.....	61
	Satélite 10.....	63
	Satélite 11:.....	65
	Satélite 13:.....	68
	Satélite 16:.....	69
	Satélite 17:.....	71
	Satélite 20:.....	73
	Satélite 23:.....	75

Satélite 25:.....	76
Satélite 31:.....	78
Satélite 32:.....	80
6.2.2 Conclusiones de las medidas experimentales.....	82
Bibliografía	84
Anexo	86
Simulación con Matlab del cálculo de SAM	86

1. Introducción

1.1 Motivación del Proyecto

El cálculo de la posición por satélite ha adquirido una gran importancia en los últimos años debido a la gran ayuda que dicho sistema representa en gran cantidad de actividades como la navegación aérea, la localización de rutas en carretera o en temas relacionados con seguridad.

Pondremos como ejemplo de este último caso, las recomendaciones de organismos como la FCC, que en el mandato E911 (1996) pone de manifiesto la necesidad de que los terminales móviles sean capaces de señalizar, con gran precisión, la posición del usuario, en caso de que éste realice una llamada de emergencia.

Este requisito, resulta un hecho trivial en una gran cantidad de situaciones gracias al GPS. Recordemos que el posicionamiento por satélite, dándose las condiciones idóneas, puede llegar a tener una precisión de unos pocos centímetros. No obstante, este sistema tiene algunas limitaciones, ya que existen ciertos escenarios (escenarios interiores, escenarios urbanos, escenarios forestales) que dificultan el correcto funcionamiento del sistema, ya que por las características del medio, se impide la visión directa de la constelación de satélites GPS por parte del usuario.

Aunque pueda parecer que son pocas las situaciones en las que nos podría interesar realizar un cálculo de posición en un escenario indoor (nombre con el que de aquí en adelante nos referiremos a dichos escenarios), lo cierto es que pasamos la mayor parte de nuestros días en ellos (parkings, en el interior de edificios, zonas urbanas, etc.).

Para intentar solucionar los problemas relacionados con la localización GPS en entornos indoor, se investiga a cerca de nuevas técnicas de adquisición de señal y nuevos métodos para evitar los problemas provocados por dichos escenarios, como receptores de alta sensibilidad o técnicas de posicionamiento de alta sensibilidad.

1.2 Descripción del proyecto

En la primera parte del proyecto realizaremos una explicación de los fundamentos del sistema de posicionamiento por satélite profundizando esencialmente en la comunicación satélite-usuario, y también en el receptor utilizado para ella.

A continuación abordaremos el problema derivado de la falta de visión directa de la señal GPS, y cómo afecta a la hora de la adquisición de señal en el receptor. Al mismo tiempo que proponemos el uso de una métrica con la cual podemos deducir si la comunicación entre el satélite y el receptor es de visión directa o no.

En último lugar, expondremos algunos de los resultados analizados durante el proyecto para mostrar los problemas del sistema GPS en indoor, y para verificar si la métrica propuesta nos puede proporcionar alguna ayuda.

Algunos de los resultados analizados durante el proyecto, fueron utilizados para realizar una publicación (*Multipath Detection Metrics and Attenuation Analysis Using a GPS Snapshot Receiver in Harsh Environments*) en el congreso internacional EuCAP 2009 (*3rd European Conference on Antennas and Propagation*) que tuvo lugar en Berlín del 23 al 27 de marzo de 2009.

2. Fundamentos del sistema GPS

2.1 Introducción a GPS

El sistema de posicionamiento global, o GPS como comúnmente se le conoce, es un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) que permite realizar el cálculo de posición desde cualquier parte del mundo con una gran precisión.

Los primeros proyectos relacionados con la navegación por satélite se remontan a los años 70 cuando se iniciaron varios proyectos por parte del ejército de los Estados Unidos, entre ellos destaca el *U.S Navy Navigation Satellite System* (también conocido como *Transit*).

Dicho sistema estaba constituido por una constelación de 6 satélites alrededor de la Tierra que proporcionaban cobertura en todo el mundo, pero no de manera continuada, debido al reducido número de satélites en órbita.

Paralelamente la URSS también trabajaba en otro proyecto similar (TSICADA), por lo que el gobierno de los EUA decidió iniciar un grandísimo proyecto (se calcula que hasta 1994 se invirtió en él cerca de 14.000 millones de dólares) para conseguir el liderazgo de la navegación por satélite.

El sistema era conocido en sus inicios como NAVSTAR GPS (*Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System*) y estaba formado por un total de 24 satélites que acabaron de ponerse en órbita en agosto de 1993. Más tarde en 1994 la Agencia Federal de Aviación (FAA) anunció que el sistema GPS estaba listo para ser usado en la navegación aérea.

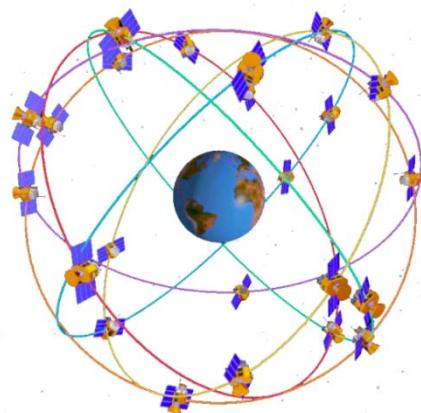


Figura 2.1: Constelación de satélites GPS

Debido a los avances tecnológicos y al crecimiento del mercado, en el año 2000 se inició, por parte del gobierno estadounidense, el proyecto GPS-III. Con él, se aumentarán el número de satélites y de estaciones terrenas de control, añadiendo además nuevas señales de navegación tanto civil como militar, mejorando de esta manera la precisión y la disponibilidad para todos los usuarios. El lector interesado en el tema podrá encontrar una amplia información sobre la modernización de GPS en [1].

2.2 Cálculo de la Posición

El concepto fundamental en que se basa el sistema GPS para realizar el cálculo de la posición es el siguiente: se puede encontrar la situación de cualquier punto del espacio a partir de la distancia existente entre dicha posición y otros puntos (cuyo número dependerá de las dimensiones del espacio) de los cuales sí se conoce sus coordenadas en el espacio.

Para aclarar esta explicación nos situaremos en el espacio bidimensional de la figura 1.2, como podemos observar la posición que buscamos (s_0) queda determinada de manera única a partir de la distancia existente entre 3 puntos conocidos (s_1, s_2 i s_3).

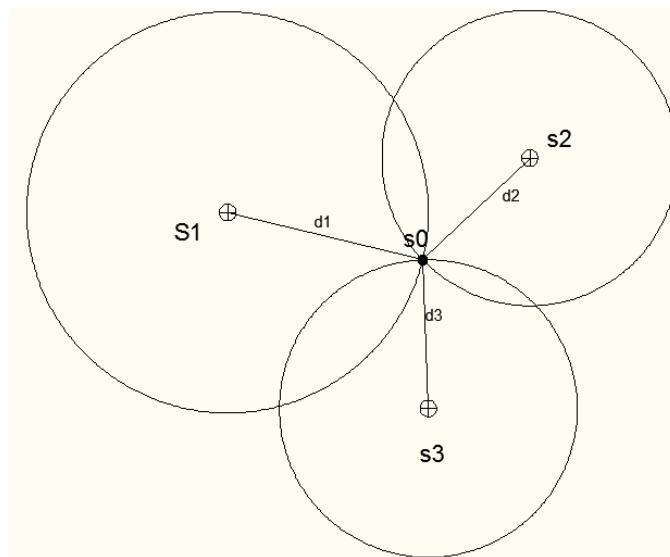


Figura 2.2: Cálculo de posición en 2D

En caso de que sólo tuviésemos los puntos de referencia s_1 y s_2 , existirían dos posiciones en el espacio a una distancia d_1 del primer punto y a d_2 del segundo punto, como se refleja en la figura 2.3.

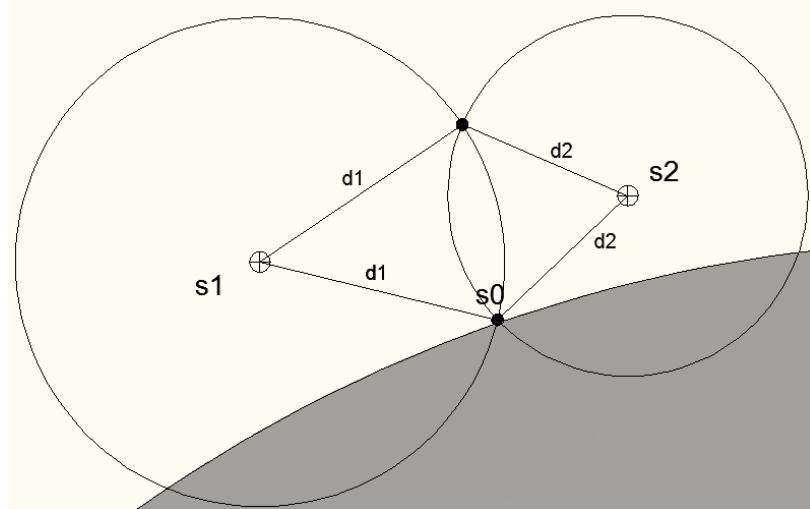


Figura 2.3: Cálculo de posición sin el número necesario de puntos referencia

Para poder trasladar esta misma técnica a un espacio tridimensional, nos encontramos con el hecho de que la forma geométrica que forman todos los puntos que se encuentran a una misma distancia de un lugar de referencia, es una esfera en lugar de una circunferencia como sucedía anteriormente, con lo cual si sólo tuviésemos 3 puntos de referencia, aún tendríamos 2 puntos que cumplirían dichas propiedades.

A pesar de que uno de dichos puntos pudiera ser descartado por no encontrarse en la superficie de la tierra (como pasa en la figura 2.3 para el caso bidimensional), se recurre a un cuarto punto de referencia que solucione el cálculo de la posición.

En el sistema GPS, la función de los puntos de referencia de los cuales hemos estado hablando hasta ahora, es realizada por los satélites en órbita. Como a priori no sabemos a cuanta distancia se encuentra cada satélite respecto al usuario, y esta información es clave para realizar el cálculo de la posición, se envía de forma continua una señal desde cada satélite con la cual, una vez recibida, es posible medir la distancia existente entre el receptor y el satélite, a partir del retraso producido por del tiempo de propagación de la señal.

En la práctica, esta distancia calculada contiene una deriva provocada por fenómenos como el retraso introducido en la señal por el hecho de atravesar la ionosfera y la troposfera, o por ejemplo, una posible desincronización entre el reloj del satélite y el reloj del receptor. Es por esto, por lo que las distancias encontradas se conocen como pseudorangos.

Para corregir dicha deriva se la trata como una incógnita más, junto a la posición de usuario (3 incógnitas), lo cual nos obliga a utilizar 4 satélites para resolver el cálculo de posición.

La manera en que se calculan los valores de pseudorango y como se obtiene la posición del usuario, se explica con más detalle en los capítulos 2.5 y 2.6 de [Tsu05]

2.3 La señal GPS

Los satélites GPS emiten dos tipos de señales, la primera lleva consigo los códigos necesarios para realizar la adquisición de la señal (*Coarse/Acquisition*) y la segunda es la encargada de emitir los códigos de precisión, estos últimos están modificados con un código Y, por eso se les conoce como P(Y).

Los códigos P(Y) no pueden ser utilizados a nivel civil, debido a que son códigos clasificados, por eso, en este trabajo sólo haremos referencia a la señal C/A.

El sistema GPS trabaja con dos frecuencias transmisoras L₁ (1575.42MHz) y L₂ (1227.6MHz) ambas son coherentes con 10.23 MHz (ya que el reloj que contienen los satélites es de dicha frecuencia). En la banda L1 se transmite mediante una modulación QPSK (modulación en fase) los códigos C/A y los P(Y). Como sólo trabajaremos con los códigos C/A, podemos considerar que trabajamos con una modulación BPSK, en la que se envían dos símbolos (-1 o 1) en función del bit que se quiera transmitir.

Debido a que cada satélite emite información totalmente distinta, pero todos a la misma frecuencia L1, hay que encontrar un modo para poder diferenciar entre dichas señales. Esto se consigue multiplexando las señales por código, es decir, cada satélite utiliza un secuencia única que es ortogonal con respecto a la de los demás satélites, lo cual, nos permite distinguir entre las señales de diferentes satélites y poder trabajar únicamente con aquél que nos interesa. Este método se conoce como CDMA (*code división multiple access*).

Existen otros tipos de multiplexación, como la multiplexación por tiempo o por frecuencia, pero como hemos explicado, para el caso de CDMA, todos los códigos utilizan la misma banda de frecuencias y también el mismo espacio temporal, como se aprecia en la figura 2.4

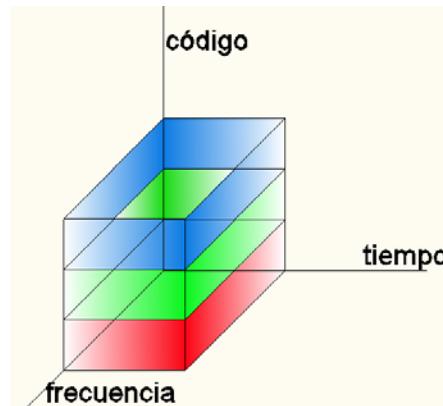


Figura 2.4: Método de acceso múltiple por división de código

Además, para transmitir la señal GPS se utiliza un ensanchado del espectro de la señal mediante DSSS (direct sequence spread spectrum).

2.4 Ensanchado del espectro de la señal GPS

En los sistemas de espectro ensanchado mediante DSSS como GPS, se parte de una modulación con un ancho de banda limitado, que al ser multiplicada por una secuencia código con un ancho de banda superior, resulta en una modulación con un espectro mucho más ancho.

Estos tipos de sistemas tienen su origen en el entorno militar con el fin de camuflar la señal esparciendo su espectro para que se confunda con el ruido (recordemos que la densidad espectral del ruido blanco tiene el mismo valor para todas las componentes frecuenciales).

2.4.1 Sistema de modulación

Para ensanchar el espectro de la señal GPS se utiliza el modulador de la figura 2.5.

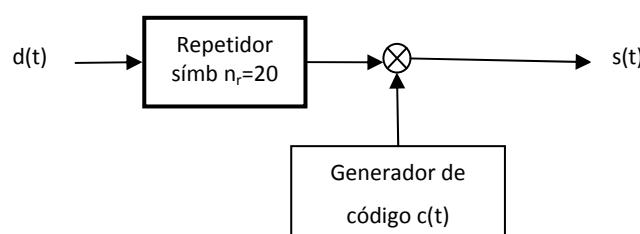


Figura 2.5: Método de transmisión CDMA

La secuencia $c(t)$ está formada por 1023 valores con amplitudes +1 o -1 distribuidos de forma pseudo-aleatoria. Cada uno de estos valores recibe el nombre de chip y su duración se conoce

como tiempo de chip (T_c), que es igual a 977,52 ns, por lo que la duración de la secuencia completa es igual a 1ms.

La secuencia $d(t)$ representa la señal modulada mediante BPSK cuyo espectro hay que ensanchar. Por eso, la secuencia está formada por símbolos de amplitud +1 o -1. Como vemos en la figura 2.5, cada símbolo de la secuencia es repetido 20 veces para facilitar la adquisición de la señal en recepción (como veremos en el tema siguiente) formando lo que se conoce como de bit de navegación.

Por las propiedades de la transformada de Fourier, al ser el tiempo de chip T_c mucho más pequeño que el tiempo de bit T_b , tenemos que el espectro de la señal $s(t)$ es mucho más ancho de lo que resultaría si enviásemos la secuencia $d(t)$ sin multiplicar con el código $c(t)$.

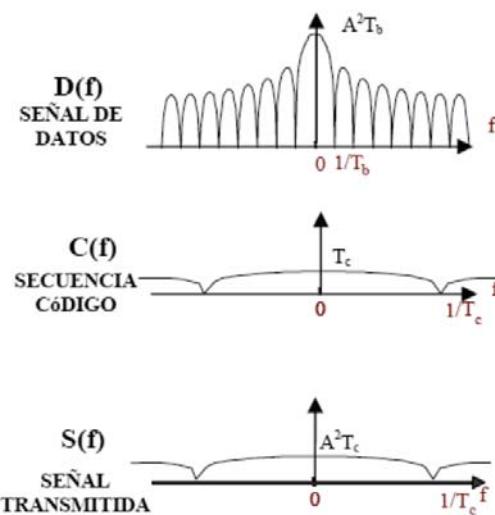


Figura 2.6: Espectro de las señales $d(t)$, $c(t)$ y $c(t)d(t)$ [Sal03]

En la figura 2.6, podemos ver el espectro de la señal $d(t)$ y el espectro de la secuencia $s(t)$. En ambos casos, observamos una función sinc, aunque para $d(t)$ el espectro es mucho más estrecho que en el caso de $s(t)$, ya que recordemos que $T_c \ll T_b$. Además, observamos que el tiempo de chip provoca que la potencia de la señal transmitida $s(t)$ sea muy baja.

En la figura también se puede observar que el espectro del código $c(t)$ es un muy plano y de potencia muy baja, por ese motivo a este tipo de códigos se les conoce como códigos de pseudo-ruido.

El hecho de ensanchar el espectro de la señal nos aporta una serie de ventajas, como por ejemplo:

- Es muy útil a la hora de combatir interferencias como jamming, interferencias entre usuarios del mismo sistema, multipath,...
- Al reducir la potencia del espectro de la señal transmitida, se camufla entre el ruido, siendo muy difícil de detectar
- Privacidad entre usuarios
- Podemos obtener medidas muy precisas sobre los retrasos de propagación. Lo cual es muy útil en GPS para poder calcular el valor de los pseudo-rangos.

2.5 Los códigos C/A

Los códigos C/A son aquellos que hasta ahora hemos llamado $c(t)$ y que servían para ensanchar el espectro de la señal a enviar. Dichos códigos pertenecen a la familia de las secuencias Gold, que es una de las más utilizadas.

Una de las propiedades más importantes de estos códigos es que son quasi-ortogonales, lo cual quiere decir que la correlación de dos códigos diferentes es casi nula, pero no del todo, por lo que existe una pequeña interferencia entre usuarios del mismo sistema. En cambio, al realizar la autocorrelación de un código determinado obtenemos un pico de una gran amplitud centrado en la correlación resultante.

En la figura 2.8 podemos observar cómo se cumplen las propiedades que hemos comentado con los códigos de los satélites 6 y 12 (escogidos al azar) de la figura 2.7.

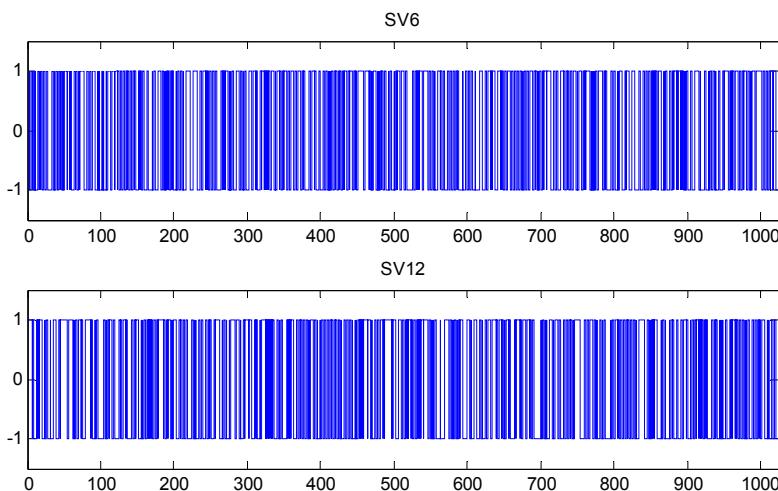


Figura 2.7: Secuencias Gold de los satélites 6 y 12

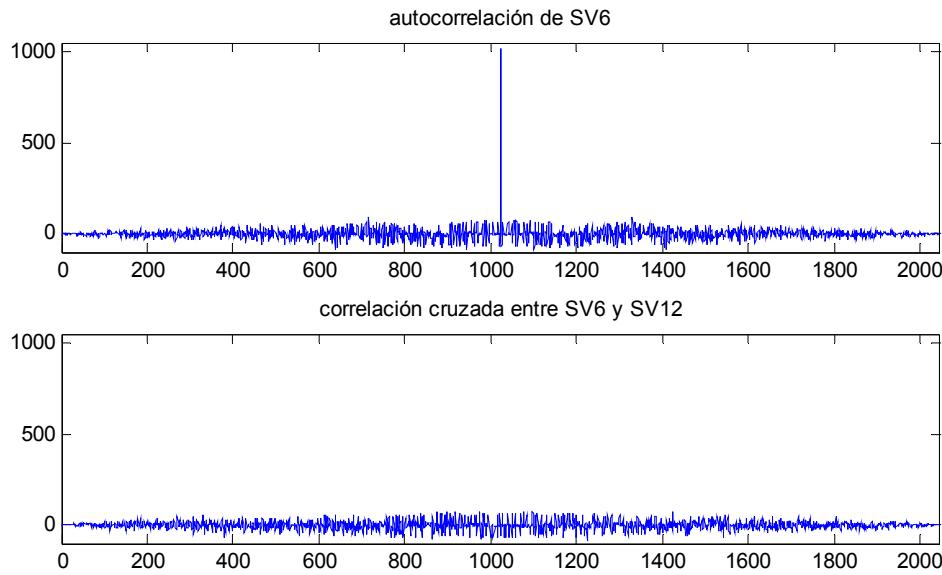


Figura 2.8: Propiedades de autocorrelación de los códigos Gold

2.5.1 Generador de secuencias Gold

Para generar los diferentes códigos, se utilizan unos registros de desplazamiento que son realimentados con una combinación de los bits del registro. En el caso de los códigos utilizados en GPS, estos registros tienen 10 posiciones.

La retroalimentación viene determinada por los polinomios de ‘feedback’, que se muestran en las ecuaciones (2.1) y (2.2).

$$g_1(x) = 1 + x^3 + x^{10} \quad (2.1)$$

$$g_2(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^6 + x^8 + x^9 + x^{10} \quad (2.2)$$

Como hemos dicho, a partir de los polinomios de ‘feedback’, queda determinada la realimentación de los registros. El caso de la figura 2.9 corresponde al registro del polinomio (2.1).

Con los polinomios (2.1) y (2.2) obtenemos dos secuencias Gold, el resto, se obtiene a base de sumar una de los dos con el otro desplazado.

El problema derivado de utilizar esta familia de códigos, es que no son del todo ortogonales, ya que, al realizar la correlación de dos secuencias diferentes, obtenemos un valor muy pequeño, pero no 0.

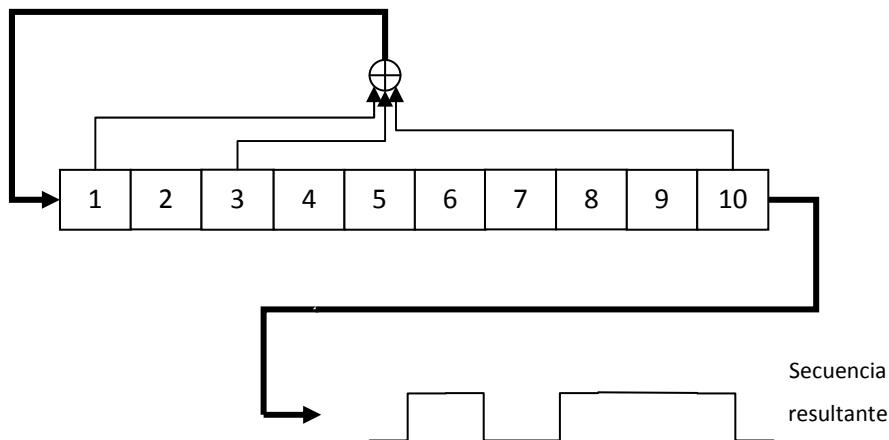


Figura 2.9: Generador de secuencias Gold

2.6 Bits de navegación:

Como se explica en el capítulo anterior, los códigos C/A están modulados de manera que la fase de la señal va cambiando de 0 a π a una frecuencia de 1023 MHz. Sin embargo, estos códigos no se utilizan como bits para enviar los datos de navegación, sino que estos últimos, se forman a partir de 20 códigos C/A seguidos y con la misma fase, por lo tanto, cada bit de navegación tiene una duración de 20 ms (20 secuencias C/A de 1ms) con lo que la frecuencia de los bits de navegación es de 50Hz.

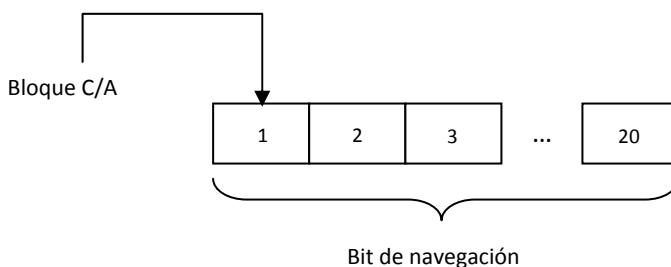


Figura 2.10: Bit de navegación

El motivo por el cual se envían 20 bloques C/A por cada bit de navegación, se explicará con más detalle en el capítulo de receptor GPS, ya que está relacionado con la adquisición de la señal GPS.

Con los bits de navegación explicados durante este apartado, se forman palabras de navegación en las que se envían los paquetes de datos. La figura 2.11 contiene un esquema del formato de datos explicados hasta ahora.

No profundizaremos más en el tema del formato de los datos GPS. Por lo que, para un análisis más exhaustivo, se recomienda leer los capítulos del 5.8 en adelante de [Tsu05].

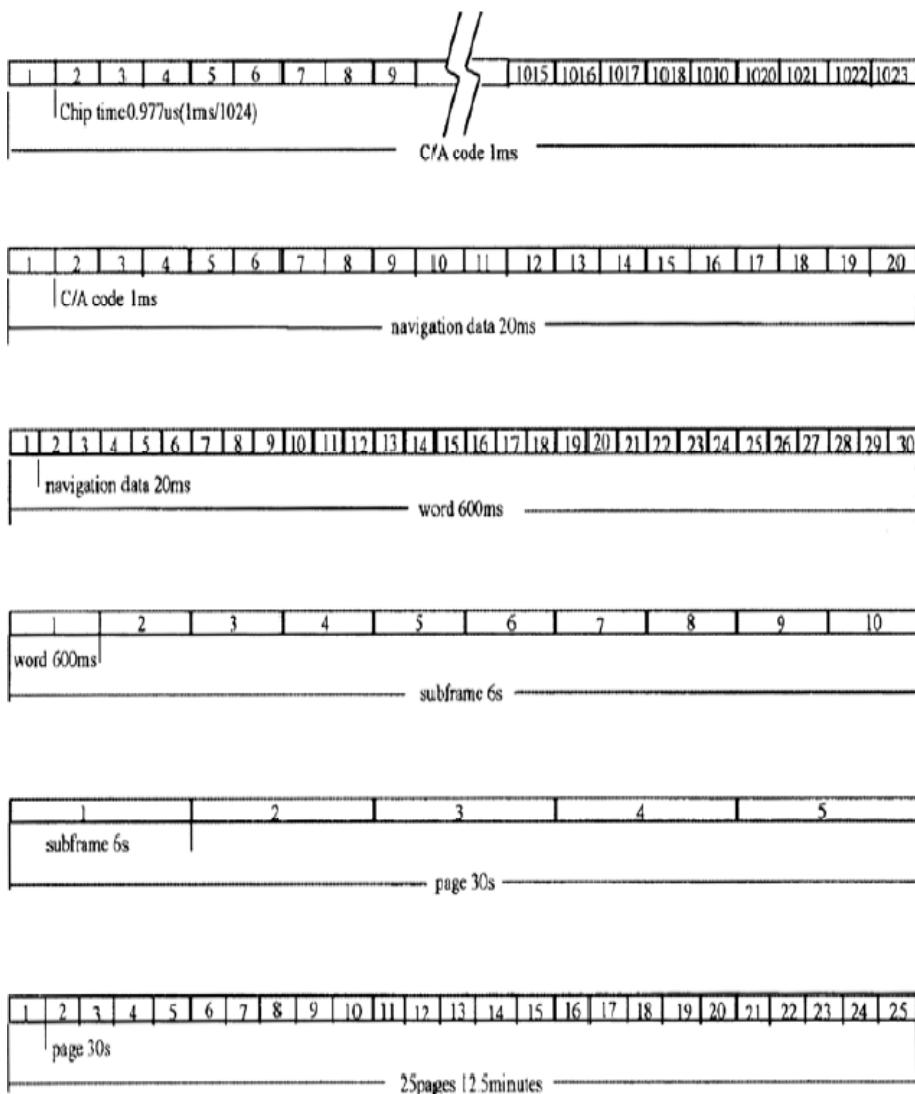


Figura 2.11: Formato de los datos GPS [Tsu05]

3. El receptor GPS

En la figura 3.1 se puede observar un diagrama de bloques con las partes más importantes de un receptor GPS.

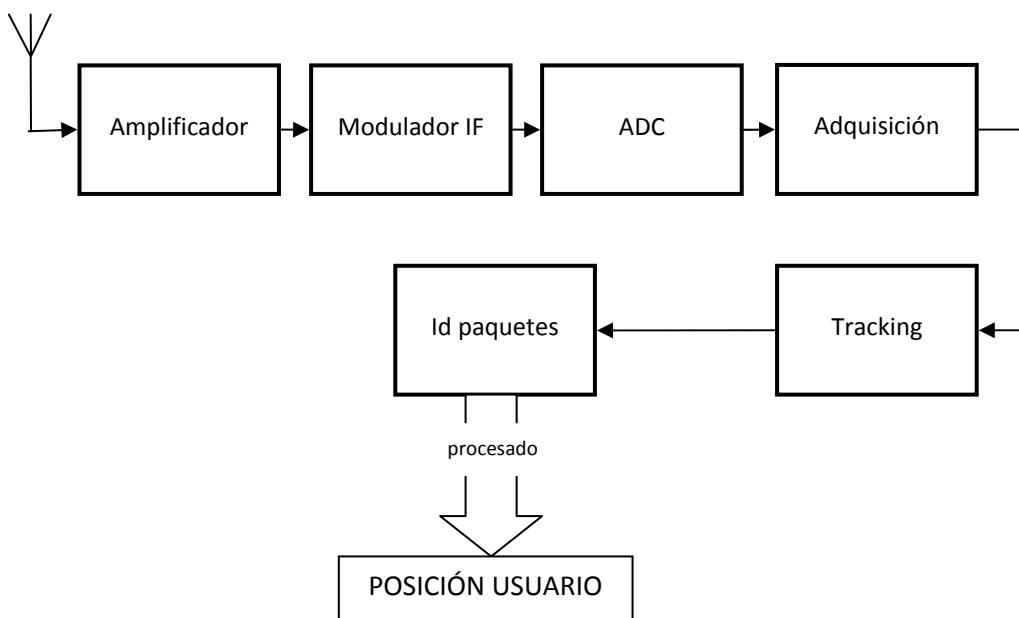


Figura 3.1: Diagrama de bloques del receptor GPS

La señal GPS de la banda L1 es capturada por la antena, para después ser amplificada y modulada a una frecuencia intermedia y filtrada. Posteriormente se convierte la señal a digital, con un conversor analógico-digital, para poder trabajar con ella más fácilmente en los bloques de adquisición y *tracking*. En estos bloques, se consigue separar la señal de un satélite determinado de las demás (recordemos que todos los satélites emiten a la misma frecuencia).

Una vez se ha localizado la señal de los diferentes satélites, se procede a identificar los paquetes enviados por el mismo, para calcular los valores de pseudo-rango y la posición de los satélites, los cuales son necesarios para el cálculo de la posición de usuario.

Puesto que este trabajo se centra en el bloque de adquisición, no profundizaremos en los demás. Para un análisis más profundo de los diferentes bloques se recomienda leer los capítulos 6, 7 y 8 de [Tsu05].

3.1 Adquisición

Para poder identificar la información recibida en la señal GPS, hay que saber que satélites se encuentran presentes en el momento en que queremos realizar el cálculo de posición. Para ello, nos son muy útiles las propiedades de correlación del código C/A (capítulo 2.4), puesto que simplemente correlando el código de un determinado satélite con la señal recibida (debidamente alineados) podemos decidir si dicho satélite se encuentra disponible o no.

Podemos agilizar el proceso de adquisición, si en vez de buscar entre todos los satélites posibles, correlando la señal entre todos los posibles códigos de satélites existentes, pasamos al receptor una información de asistencia para que sepa que satélites puede utilizar en ese momento. Esta técnica se conoce como Assited-GPS (A-GPS) [2] y como veremos más adelante esto es esencial en escenarios en los cuales no hay visión directa entre la antena receptora y el satélite, puesto que el proceso de adquisición es mucho más largo que en escenarios *outdoor*.

Para encontrar la señal de un determinado satélite, nos encontramos con un par de problemas, y es que, hay que localizar el inicio del código C/A, así como hallar el desplazamiento frecuencial producido por el efecto doppler como consecuencia del movimiento del satélite o del propio receptor.

En la ecuación 3.1 se describe la forma de la señal, tal y como la veremos al llegar al bloque de adquisición.

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n \sum_{i=1}^{20} c(t - iT_{CA} - nT_{nav} - \tau) e^{j(2\pi(f_c + f_d) + \varphi)} + w(t) \quad (3.1)$$

Donde:

- d_n es el valor del bit de la secuencia de información.
- $c(t)$ es la secuencia código C/A
- T_{CA} y T_{nav} son los tiempos de código C/A y de bit de navegación (1 y 20 ms)
- $w(t)$ es el ruido AWGN añadido por el receptor.
- f_c es la frecuencia portadora de la señal
- τ es el retraso con el cual recibimos cada secuencia C/A
- f_d es el desplazamiento en frecuencia provocado por el efecto doppler

Como vemos, la señal $s(t)$ cumple con lo comentado hasta ahora. Se trata de una señal modulada en BPSK, que utiliza 20 secuencias de un mismo código C/A para trasmitir cada bit de información de la secuencia $d(t)$.

En la figura 3.2 podemos ver las partes básicas del bloque de adquisición de señal:

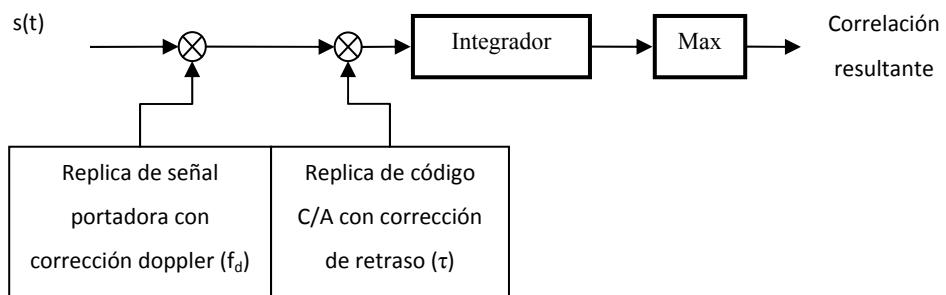


Figura 3.2: Adquisición de 1 bloque C/A

Como hemos comentado, la adquisición consiste en encontrar los valores aproximados (ya que posteriormente estos serán perfilados en el bloque de tracking) del inicio del código C/A de la señal recibida y el desplazamiento doppler de la señal. El primer dato se encuentra a base de hacer la correlación de la señal recibida con el código C/A con diferentes valores para el desplazamiento temporal τ . No debemos olvidar que la frecuencia doppler (f_d) de la señal recibida provoca un cambio en la duración del tiempo de chip, por lo que también hay que corregir este efecto si queremos encontrar el valor de τ .

Una de las posibles maneras de encontrar estos valores es ir variando los valores de f_d y de τ hasta que con una de dichas correlaciones obtengamos el valor más grande. Ese valor, determinará si la señal del satélite está presente o si se trata solamente de ruido. El nivel sobre el cual podemos decidirlo vendrá dado por la probabilidad de falsa alarma (cuanto más alto se encuentre este umbral, menor será la probabilidad de confundir un pico de ruido con la correlación).

Encontrar los valores que buscamos de esta forma no es sencillo, ya que existen muchas combinaciones entre los valores de f_d y de τ lo cual puede provocar, que en la adquisición de señales muy débiles, el tiempo necesario sea muy elevado.

Por ello se recurre a fijar una de las dos dimensiones en las que buscamos, mediante el cálculo de la transformada de Fourier de la señal entrante, lo cual nos proporcionará la frecuencia de la portadora de la misma y así el desplazamiento doppler. De esta manera tan sólo hay que buscar entre los posibles valores de τ , como podemos ver en la figura 3.3.

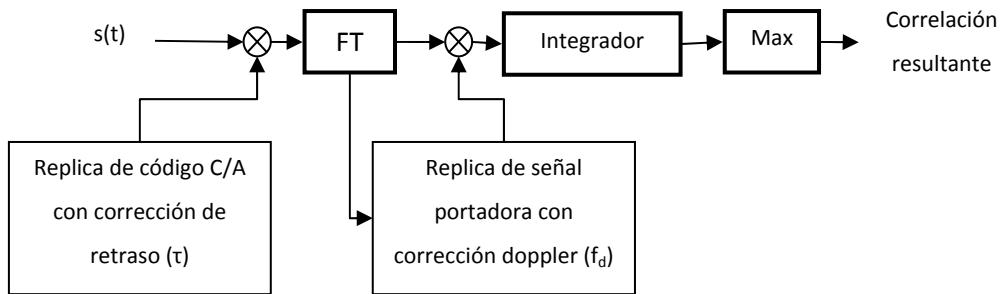


Figura 3.3: Adquisición de 1 bloque C/A con el método de la transformada de Fourier

La eficiencia de este método estará ligada al tiempo de implementación de la transformada de Fourier, puesto que si este proceso necesita más tiempo del que necesitábamos con el método anterior, no obtenemos ningún beneficio.

El método explicado durante este punto para adquirir la señal GPS, consigue que a la salida del correlador la relación señal a ruido sea máxima.

No obstante, hay ocasiones en que el resultado a la salida del correlador está muy deteriorado debido al ruido y a la atenuación sufrida por la señal durante su transmisión. Para conseguir identificar la señal a pesar de dichas dificultades se puede recurrir a las técnicas de integración coherente y no-coherente.

3.1.1 Integración coherente/no-coherente

Si recordamos la forma de la señal GPS recibida (3.1) al pasar ésta a través del correlador, comentado en el punto anterior, el resultado es equivalente a correlar la señal por el código C/A una vez hemos quitado la señal portadora.

$$r_s(t) = s(t) * c(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n \sum_{i=1}^{20} r_c(t - iT_{CA} - nT_{nav}) + n(t) \quad (3.2)$$

El resultado a la salida del correlador se puede ver en (3.2), que corresponde a una serie de 20 autocorrelaciones del código C/A, con la misma amplitud d_n y separadas por T_b .

Lo comentado hasta ahora sobre la adquisición de señal hace referencia a la correlación de un código C/A recibido (1ms), consigo mismo, de manera que deberíamos obtener un pico de correlación muy grande, debido a las propiedades de autocorrelación de los códigos C/A. Pero al recibir la señal, a esta se le ha añadido un ruido AWGN (ruido blanco y gaussiano) al cual llamamos en (3.1) $w(t)$. Al pasar la señal por el correlador, el ruido también es correlado con el código C/A, obteniendo un ruido que deja de ser blanco, pero que continúa teniendo una distribución gaussiana de media 0, $n(t)$ en la ecuación (3.2).

Si el pico de correlación $r_c(t)$, fuese mucho más grande que la amplitud del ruido $n(t)$, sería muy sencillo poder diferenciar entre ambos. Para que esto suceda se recurre a sumar diferentes correlaciones de manera que se elimina el ruido que contiene cada una, mientras que el pico de autocorrelación va aumentando.

El principio por el cual funciona dicha técnica se debe a que, como antes hemos comentado, el ruido $n(t)$ tiene una distribución gaussiana de media 0, si tuviésemos infinitas muestras de ruido n_i , las cuales pueden escribirse como: $n_i = \mu + e_i$, (donde μ es la media de la distribución), existirán un par de muestras n_i cuyo valor de e_i , tendría el mismo valor, pero con signo opuesto, de manera que si son sumadas el resultado es igual a la media de la distribución, que en este caso es 0.

Por lo que al sumar una gran cantidad de picos de correlación el ruido tiende a desaparecer, y de esta forma el nivel de la señal respecto al ruido aumenta.

Este es el motivo por el cual cada bit de navegación está formado por 20 códigos C/A con el mismo símbolo d_n , para que se puedan sumar las correlaciones necesarias y poder distinguir la señal del ruido.

Demostración:

Para demostrar que esta técnica funciona como hemos explicado, simularemos la recepción de 20 códigos C/A del satélite número 6, sobre los cuales se ha producido una fuerte atenuación (α_i) y se ha añadido una secuencia de ruido $n_i(k)$. Podemos escribir cada código recibido como $c_{rx_i}(k) = \alpha_i c_i(k) + n_i(k)$.

Al pasar cada código recibido por el correlador el resultado es el de la figura 3.4, donde podemos ver 20 códigos filtrados, y centrados sobre el pico máximo de la correlación.

Como se puede apreciar el nivel de ruido es muy alto, por lo que es difícil distinguir entre éste y el pico máximo de correlación, y por lo tanto es casi imposible determinar si existe o no señal del satélite 6.

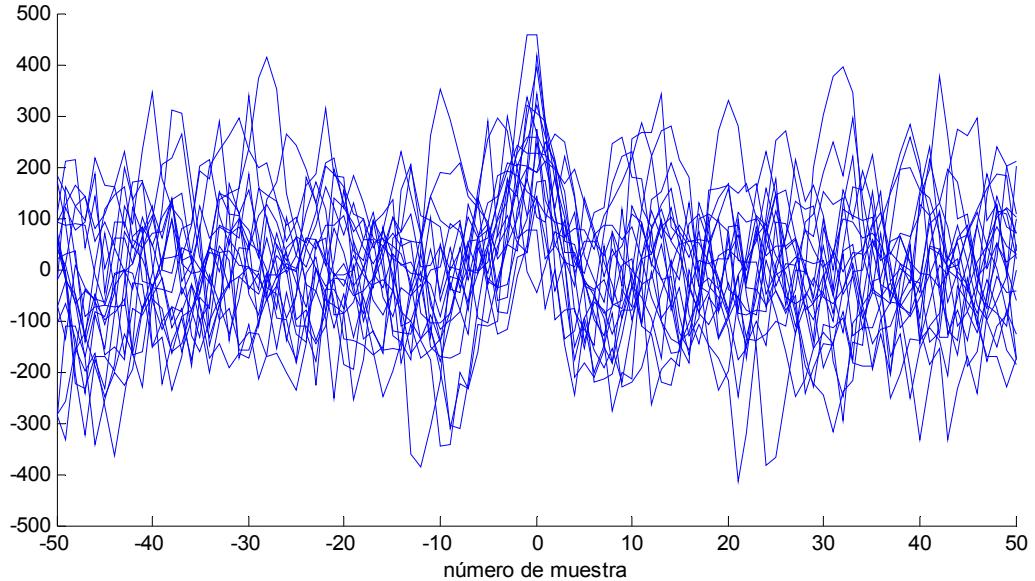


Figura 3.4: Correlación de 20 bits de navegación afectados por el ruido

Por lo que se procede a sumar las 20 códigos filtrados, para así poder reducir el nivel de ruido.

El resultado (figura 3.5) es un pico de correlación mucho más elevado que el nivel del ruido, con lo que la probabilidad de confundir la correlación con un pico de ruido es menor.

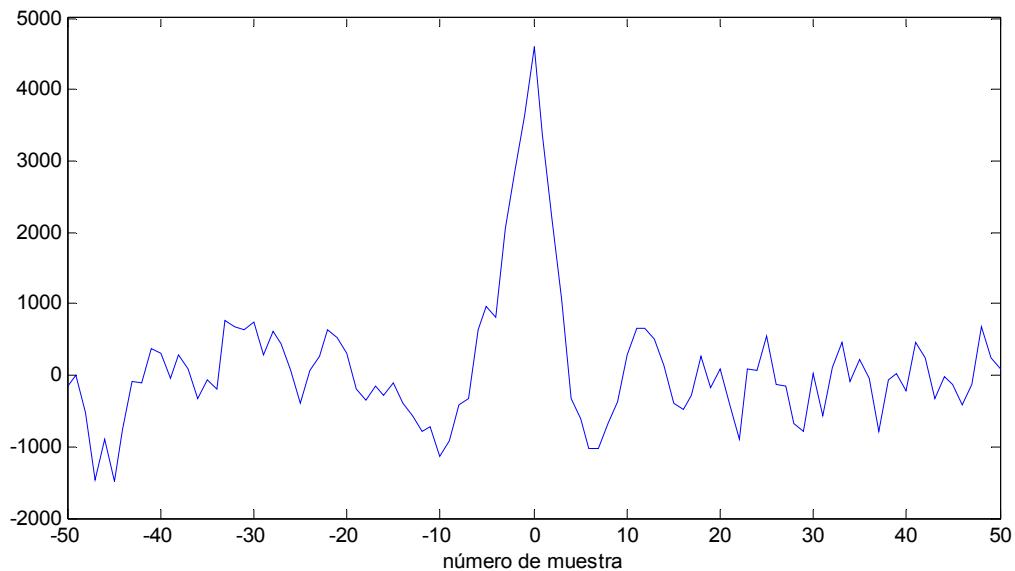


Figura 3.5: Integración coherente de 20 códigos C/A

Lo que hemos hecho durante la demostración es utilizar los 20 códigos C/A que forman un bit de navegación, para integrar sus correlaciones de forma coherente, ya que todos tenían la misma amplitud porque forman parte del mismo bit.

En teoría, podríamos realizar una suma de infinitos picos de correlación y de esta forma el ruido desparecería por completo. Pero en la práctica esto no es posible, ya que para empezar, el tiempo de integración coherente vendrá limitado por la duración de cada bit de navegación (20ms o 20 picos de correlación).

Por eso, en ocasiones se recurre a hacer una integración no coherente entre diferentes bits de navegación, la cantidad de los cuales (N_i) puede variar en función de los requisitos de cada escenario, aunque como explicaremos posteriormente, dicha cantidad se verá restringida por una serie de razones.

En la figura 3.6 se muestra el diagrama de bloques de este método:

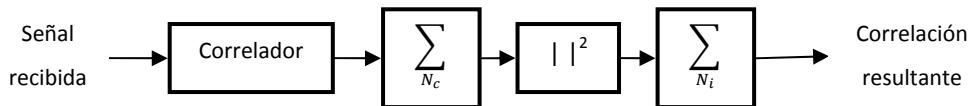


Figura 3.6: Bloque de adquisición con integración coherente/no-coherente

El correlador de la imagen es el encargado de correlar cada código C/A con una réplica generada en el receptor (Figuras 3.2 y 3.3).

El valor de N_c vendrá limitado por la duración del bit de navegación, ya que dentro de cada uno hay 20 códigos C/A con el mismo símbolo (+1 o -1), y por lo tanto, no se puede sobre pasar este límite, ya que se produciría un cambio de fase entre bits de navegación.

Para corregir el posible cambio de signo que se pueda producir entre dos bits de navegación consecutivos, hacemos el modulo del resultado de la correlación coherente de cada bit de navegación, y lo elevamos al cuadrado, de esta manera conseguimos que aquellos valores pequeños provocados por el ruido se hagan aún más pequeños y no tengan tanto peso en el resultado de la integración no coherente.

Y finalmente, sumamos tantas correlaciones coherentes como sea necesario para encontrar la señal del satélite (en caso de que exista) para posteriormente hallar los valores de los desplazamientos temporal y frecuencial, los cuales eran imposibles de encontrar con el método de adquisición tradicional.

La integración coherente y no coherente puede mejorar notablemente la relación de la correlación sobre el ruido, facilitando notablemente su adquisición. Pero si tenemos en cuenta que para encontrar el inicio de un código C/A (1ms) se calculan alrededor de 2500 correlaciones (suponiendo que el desplazamiento doppler se encuentra gracias a la FFT), nos damos cuenta de que cuanto mayores sean los tiempos de integración más tiempo se requerirá para hacer la adquisición y mayores serán los requisitos que deberá cumplir el receptor, como la memoria, velocidad de procesado, etc.

Esto, junto a los errores residuales, de frecuencia y de ruido, por los que se encuentran afectados los picos de correlación, impiden que se pueda utilizar un intervalo de integración no-coherente muy largo.

3.2 Identificación de Paquetes

Una vez se tiene una primera idea de cuál es el valor de los desplazamientos temporal y frecuencial, estos se pasan al bloque de tracking en el cual se acaban de perfilar con más precisión.

Finalmente, se puede decodificar la información y obtener el mensaje de navegación de cada satélite, obteniendo información como pseudo-rangos, datos de efemérides de los satélites, etc.

Como parece evidente, si existe algún error en los parámetros hallados en los bloques de adquisición y tracking, la información obtenida a posteriori, no será correcta y provocará errores en el cálculo de la posición del usuario.

4. Escenarios Indoor

Los métodos de adquisición utilizados normalmente en GPS, no son eficientes en todo tipo de escenarios, por ejemplo, en aquellos en que no se tenga una visión directa entre el receptor y el satélite, como puede ser el caso de los escenarios urbanos debido a que los edificios se interponen entre dicha trayectoria. También presentan muchos problemas aquellos escenarios a los cuales la señal GPS llega muy atenuada, como pueden ser las zonas arboladas que están siendo objeto de multitud de estudios [5].

4.1 Atenuación de la señal GPS

Podemos hacer una clasificación de los diferentes escenarios existentes, a partir del nivel de la señal recibida, como se muestra en la tabla 4.1.

	Outdoor	Indoor	
		Soft-Indoor	Deep-Indoor
C/N ₀ (dBHz)	45-35	35-25	<25

Tabla 4.1: Nivel de C/N₀ en función del tipo de escenario

El valor de C/N₀ (carrier to noise ratio) es la manera más común en GPS para hablar de la relación entre la señal y el ruido, viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{|A|^2}{2N_0} \quad (4.1)$$

Donde A es la amplitud con que recibimos la señal GPS, y la N₀ viene dada por el valor del ruido blanco y gaussiano, de densidad espectral 2N₀, añadido por el receptor. El lector interesado puede encontrar en [Lop-R05] mayor información sobre el cálculo de C/N₀.

En escenarios outdoor, existe entre el receptor y, prácticamente todos los satélites utilizados para la adquisición, visión directa, por eso el nivel de la señal es tan alta en estos casos. Por el contrario, en los escenarios soft-indoor, no existe visión directa de algunos satélites, pero sí que recibimos una contribución indirecta de la señal del satélite que llega atenuada. Por último

definiremos los escenarios deep-indoor que son aquellos en que la contribución de la señal llega muy atenuada (como puede ser el interior de edificios), por lo que se hace muy difícil la adquisición de señal.

Hasta ahora hemos explicado un método para mejorar la adquisición de señal utilizando integraciones coherentes y no coherentes, de esta manera lo que se consigue es aumentar la relación señal a ruido hasta un nivel óptimo. La mejoría que proporcionan estas técnicas, se estudia en los capítulos 10.5, 10.6 y 10.7 de [Tsu05].

A pesar de que, gracias a la posibilidad de hacer integraciones (coherentes y no-coherentes) el nivel de la señal sobre el ruido mejora notablemente, necesitamos mucho más tiempo para adquirir una señal débil, ya que sólo durante este proceso se necesitan alrededor de 1-2 segundos por satélite (hasta 100 bits de navegación necesarios).

Si tenemos en cuenta que, a priori, el receptor GPS no conoce que satélites puede utilizar en cada momento, cual es el desplazamiento doppler de cada satélite, u otros parámetros necesarios para hacer el cálculo de la posición, resulta que en un escenario indoor pasará mucho tiempo hasta que el receptor pudiese realizar un cálculo correcto sobre nuestra posición. Lo cual hay que solucionar de alguna manera, como por ejemplo enviando al receptor información útil para la adquisición de señal, ahorrando de esta forma una gran cantidad de tiempo. A esta técnica se le conoce como *Assisted GPS* o A-GPS.

4.2 A-GPS

Aunque desde hacía tiempo se conocía la posibilidad de aportar información de asistencia a la adquisición de señal, a base de pasar al receptor información útil para dicho proceso, ha sido gracias al uso de tecnologías como GSM o WIFI, capaces de operar en lugares indoor, por lo que A-GPS ha cobrado una gran importancia.

Por ejemplo, en el software GPS utilizado durante este proyecto pasábamos una serie de parámetros al bloque de adquisición de señal, con los cuales podíamos ahorrar una gran cantidad de tiempo. Estos parámetros son:

- **Fecha GPS:** Informábamos al receptor de la fecha GPS (Time of the week) y la semana GPS, en las cuales empezábamos a calcular la posición.

- **Posición de referencia:** Puesto que todas las medidas tomadas durante el proyecto se realizaron en la Escuela de Ingenieros de la Universidad Autónoma de Barcelona, al receptor le enviábamos las coordenadas del centro.
- **Satélites Visibles:** Como hemos comentado antes, si el receptor tuviese que buscar entre todos los satélites el proceso de adquisición duraría demasiado tiempo. Por eso a partir los datos de una estación cercana al lugar donde nos encontrábamos.
- **Desplazamiento Doppler:** Para que el receptor tenga una idea aproximada de cuál es el desplazamiento en frecuencia de la señal provocado por el efecto doppler.
- **Correcciones:** Aunque no se ha llegado a utilizar, el software utilizado ofrece la posibilidad de corregir el efecto de la ionosfera y la troposfera, que provocan un retraso en la señal, lo cual se puede traducir en un error de unos 5 metros.

Esta técnica es de gran utilidad, ya que existen estaciones GPS que almacenan esta información en tiempo real, y esta puede ser enviada vía GSM o por internet para que pueda ser recibida, por ejemplo, en un escenario indoor.

De esta forma operan muchos receptores GPS integrados dentro de teléfonos móviles, como se puede ver en la figura 4.1.

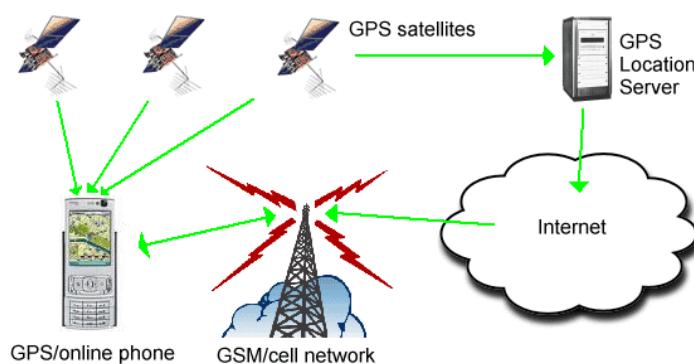


Figura 4.1: Assisted-GPS para teléfonos móviles

4.3 Multipath

El efecto de multipath (o multicamino), viene provocado por la recepción de diferentes repeticiones de la misma señal enviada, debido a la reflexión de ésta en las diferentes superficies presentes entre la trayectoria transmisor-receptor. Cada réplica llega al receptor con un retraso temporal diferente, debido a que el camino recorrido por cada una es diferente.

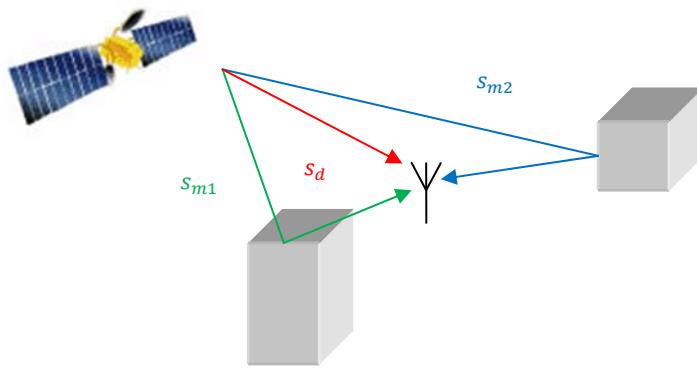


Figura 4.2 : Recepción de señal afectada por multipath

En la figura 4.2, podemos ver un ejemplo de multipath, la señal recogida por el receptor está formada por una señal directa desde el satélite s_d , y dos réplicas de la misma, como consecuencia de la reflexión de la señal en los dos objetos de la figura.

Como hemos dicho, cada señal recibida, tiene un retraso temporal como consecuencia del tiempo que necesita para realizar el camino hasta el receptor. Recordemos, que el camino recorrido por la señal directa, es el camino más corto entre el satélite y el receptor, y, por lo tanto, la distancia que recorre la señal directa es el valor de pseudo-rango, que como sabemos es vital para el cálculo de la posición. No obstante, la señal directa no tiene porque estar presente al recibir la señal, que es lo que sucede en los escenarios indoor, y en muchos escenarios urbanos donde, por ejemplo, los edificios se interponen entre el satélite y el receptor.

Puesto que, como hemos dicho, la señal recogida por el receptor es la suma de varias réplicas de una misma señal, la correlación resultante del receptor, será igual a la suma de varios picos de correlación. Esto puede escribirse como:

$$r_{tot}(t) = \sum_{m=0}^M \alpha_m r(t - \tau_m) \quad (4.2)$$

Donde α_m es la amplitud de cada señal recibida y τ_m es el retraso temporal de cada una de las M señales recogidas por el receptor. Siguiendo con el ejemplo de la figura 4.2 y de acuerdo con el modelo de señal de la ecuación (4.2), podemos representar $r_{tot}(k)$ como se hace en la figura 4.3.

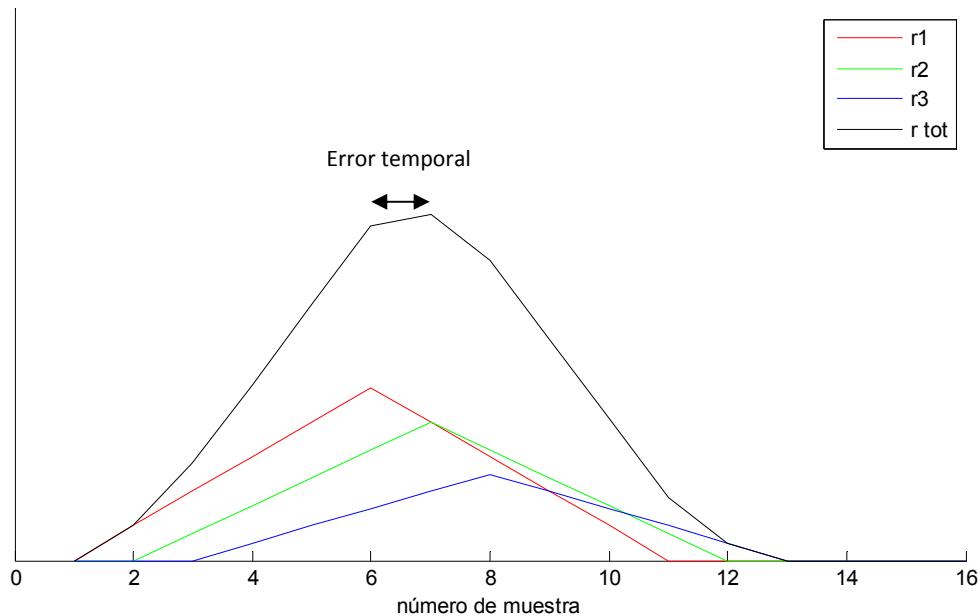


Figura 4.3: Efecto del multipath sobre los picos de correlación

Como hemos dicho, el tiempo con el que se calcula el valor de pseudo-rango de un satélite, corresponde al retraso de la señal directa. En el caso de la figura 4.3, el máximo de r_{tot} no coincide con el de la señal directa (en rojo) por lo que al realizar el cálculo del retraso de la señal, cometemos un error imposible de corregir ya que lo único que puede ver el receptor es r_{tot} . Por lo tanto, el cálculo del pseudo-rango del satélite también contendrá un error que posteriormente se traducirá en el cálculo de una posición errónea.

El efecto del multipath es uno de los mayores problemas del sistema GPS, ya que reduce la precisión de la posición calculada. Por eso es objeto de múltiples estudios con el fin de mitigar los errores que causa. En la bibliografía de este trabajo se hace referencia a algunos artículos al respecto [Pas99] y [Yun].

4.3.1 Modelado del canal con multipath

Para encontrar un modelo del canal que describa la aparición de multipath, tenemos que fijarnos en qué forma tiene la señal cuando es enviada y con qué forma llega al receptor.

Para el caso de una transmisión sin multipath el canal puede ser modelado como:

$$h(t) = \alpha_0 \delta(t - \tau) \quad (4.3)$$

es decir, una delta de dirac con un desplazamiento temporal, provocado por el retraso de la señal y una constante de atenuación α_0 , como se puede ver en la figura 4.4.

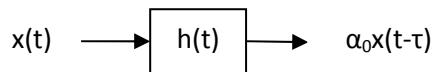


Figura 4.4: Modelo de canal sin multipath

Pero en un canal en el cual se produce multipath, lo que recibimos es una serie de réplicas, de la señal $x(t)$, atenuadas y desplazadas.

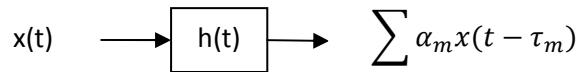


Figura 4.5: Modelo de canal con multipath

Si cada réplica de la señal en la figura 4.5, se produce a causa de un impulso con una cierta amplitud y un retraso determinado, el canal se puede aproximar por un sumatorio de impulsos retrasados y atenuados, como:

$$h(t) = \sum_{m=t_0}^{\infty} \alpha_m \delta(t - \tau_m) \quad (4.4)$$

En realidad, la ecuación 4.4 muestra una versión simplificada de la respuesta del canal con multipath, ya que ésta varía con el tiempo.

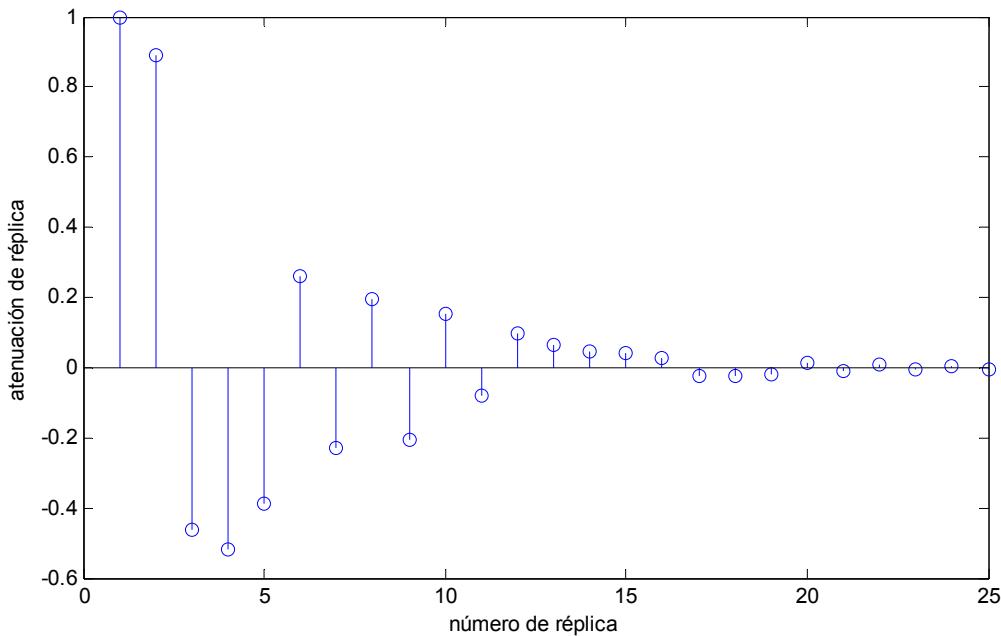


Figura 4.6: Respuesta de canal con multipath

Como se puede ver en la figura 4.6, la atenuación de las réplicas a lo largo del tiempo va decayendo hasta que recibimos réplicas que pueden no ser tenidas en cuenta, puesto que a la hora de estudiar los efectos del multipath estas no tienen prácticamente participación. De esta manera queda definido lo que se conoce como delay spread del canal, que determina el tiempo durante el cual tenemos las réplicas más significativas del canal, o lo que es lo mismo la cantidad de réplicas que contienen la mayor parte de la potencia del canal.

Para seguir con el ejemplo de la figura 4.6, podríamos decir que la réplica 14 determinaría el delay spread del canal ya que, las réplicas de la número 1 y la 14 contienen el 95% de la potencia total del canal.

De esta forma, el valor del delay spread depende de cómo está distribuida la potencia de las réplicas, en caso de que obtengamos muchas réplicas con la misma atenuación, el delay spread será muy grande, éste puede ser el caso de un escenario indoor en el que vamos a obtener muchas réplicas (debido a muebles, personas, paredes, etc.) con una atenuación parecida.

En cuanto al valor de las distintas atenuaciones podemos ver que tienden a atenuarse exponencialmente. Para modelar dichas atenuaciones se utiliza una distribución rayleigh, como la de la figura 4.7.

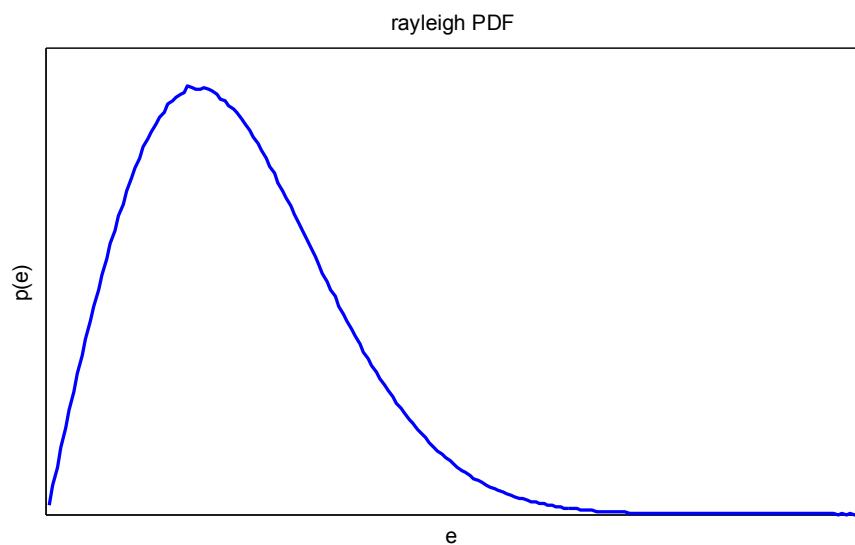


Figura 4.7: Función de densidad de probabilidad Rayleigh

La función de probabilidad de la figura nos indica cual es la probabilidad de recibir una señal de un determinado nivel e . Como se puede ver, será más fácil encontrar valores pequeños (ya que

tienen una probabilidad mayor) que valores más grandes para las atenuaciones, lo cual encaja con lo visto en el canal de la figura 4.6.

Para comprobar que el hecho de la aparición de multipath afecta directamente a la forma de la correlación de la señal recibida, derivando posteriormente en un error sobre el cálculo de la posición, simularemos el envío de un código C/A, a través del canal modelado en la figura 4.6.

Para este caso hemos escogido al azar el código C/A del satélite número 6. El resultado puede verse en la figura 4.8.

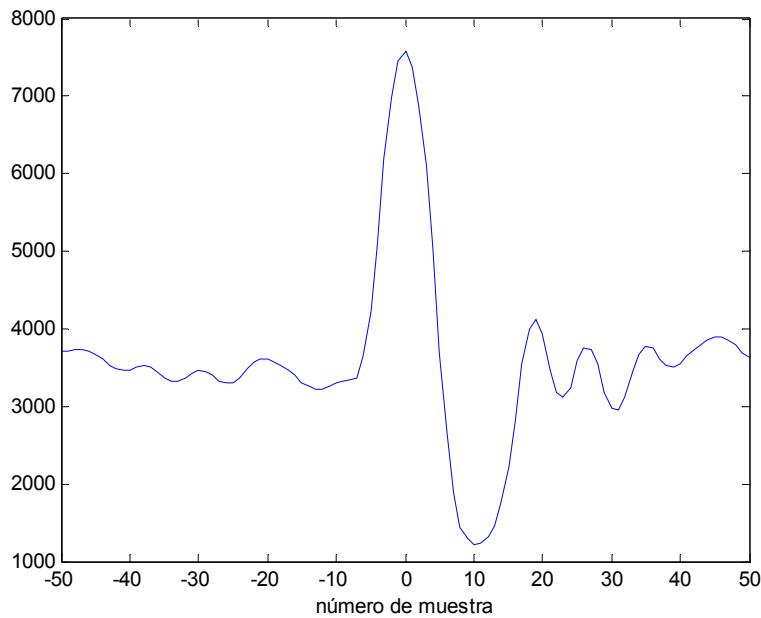


Figura 4.8: Pico de correlación afectado por multipath

donde claramente podemos ver el efecto del canal sobre la correlación final, que como antes dijimos, es la suma de las diferentes réplicas que causa el canal. En caso de que esas réplicas hayan producido un desplazamiento del pico de correlación, no tendremos conocimiento de la aparición de multipath y se producirá el error ya comentado.

Por este motivo, resultaría interesante que el receptor tuviese conocimiento de si la señal que está adquiriendo está afectada, o no, por multipath, por que al no poder corregir del todo su efecto, al menos podríamos descartar el uso de uno de los satélites si está afectado por multipath.

En el siguiente capítulo se presenta una métrica con la cual es posible decidir si determinadas señales GPS, están o no afectadas por multipath, permitiéndonos actuar en consecuencia.

5. Método para la detección de Multipath

La constelación de los satélites GPS está situada de tal forma que, en cualquier lugar del mundo y en cualquier momento, podemos llegar a tener el número suficiente de satélites para realizar el cálculo de posición.

Puede darse el caso que, dependiendo del escenario en el que nos encontremos, alguno de dichos satélites pueda encontrarse afectado por multipath, mientras que del resto podemos tener visión directa.

Como se explicó en el primer capítulo, para el cálculo de la posición, son necesarios como mínimo, 4 satélites, (aunque este número puede ser mayor en función de los requisitos del receptor). Por lo que, si algún satélite puede introducirnos errores debido al multipath, será mejor evitarlo y utilizar el resto en ese momento.

Pero, a priori, el receptor no tiene ninguna forma de detectar si un satélite está afectado, o no, por multipath. Con este objetivo se presenta lo que hemos llamado como *slope asymmetric metric* (SAM), métrica con la que se espera poder identificar si una satélite está afectado, o no, por multipath.

5.1 Fundamentos para el cálculo de SAM

El cálculo de la métrica consiste en comparar las pendientes del pico de correlación de la señal recibida, después de que esta haya sido filtrada y muestreada. Si suponemos un caso ideal , en el que no existe ruido en el receptor, y la señal no se ha visto afectada por multipath, el pico de correlación tiene la forma de la figura 5.1, donde podemos ver que el pico de correlación es totalmente simétrico respecto a la muestra 0.

En este caso, si comparamos las dos pendientes que están formadas por las 3 muestras a izquierda y derecha, respectivamente, del pico de correlación, resultará que ambas tienen el mismo valor pero con signo contrario, de esta forma, al ser sumadas el resultado es igual a cero.

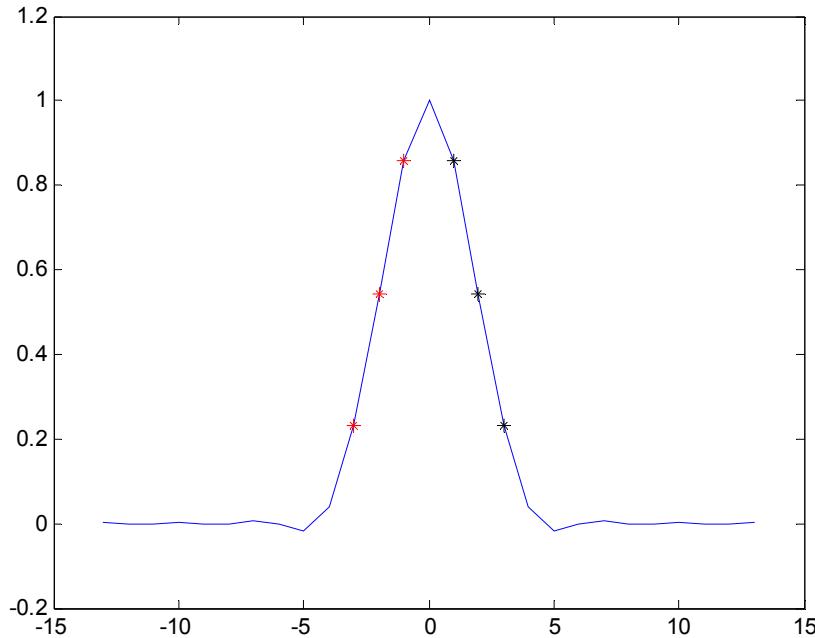


Figura 5.1: Pico de correlación ideal

Como vimos en el capítulo anterior, uno de los efectos del multipath sobre la correlación de la señal, era la modificación de la forma de esta, por lo que si calculamos la métrica SAM para una señal afectada por multipath, el resultado no será igual a cero como lo es en el caso de la figura 5.1, si no que tendrá un valor determinado a causa de que las pendientes derecha e izquierda no tienen el mismo valor.

5.1.1 Cálculo de SAM

Para explicar el cálculo de SAM dividiremos el proceso en varios puntos:

1. Primeramente, debemos asegurarnos de que estamos calculando las pendientes, derecha e izquierda, respecto al pico de correlación, ya que lo que tenemos en un principio es la señal muestreada, pero si estar alineada con su valor máximo. Para ello utilizaremos un método de interpolación (linear piecewise interpolation).
2. Normalizar cada pico de correlación con su valor máximo, ya que de esta forma la dispersión de la métrica SAM indicará el nivel de ruido que tiene la señal. Cuanto más dispersa esté menor será la potencia con la que hemos recibido la señal.
3. Calculamos los parámetros de cada recta por la que aproximamos los laterales del pico de correlación. Recordemos que la ecuación de una recta queda definida por $y = sx + b$, donde s es la pendiente de la recta que buscamos.

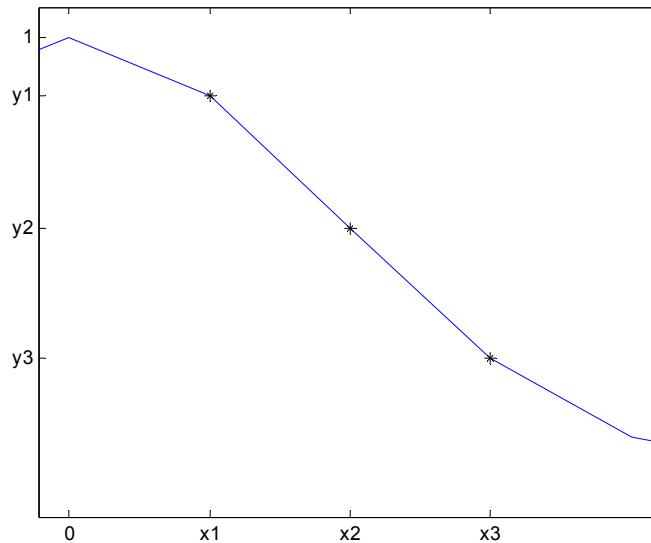


Figura 5.2: Cálculo de la pendiente derecha del pico de correlación

Para ello, pondremos como ejemplo la recta del lateral derecho y utilizaremos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} y_1 = s_r x_1 + b \\ y_2 = s_r x_2 + b \\ y_3 = s_r x_3 + b \end{cases} \quad (5.1)$$

Que podemos expresar en forma matricial mediante:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ x_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_r \\ b \end{pmatrix} \Rightarrow Y = X P \quad (5.2)$$

Para obtener la matriz de parámetros P, tendríamos que calcular la inversa de la matriz X, pero, como sabemos, para calcular la inversa de una matriz, esta ha de ser una matriz cuadrada regular, y X es una matriz 3x2.

Por eso tendremos que realizar la matriz pseudo-inversa de X, a partir de la cual obtendremos la matriz de parámetros de la recta.

4. Como comentamos anteriormente, la métrica SAM quedará definida por la suma de las pendientes de ambos laterales del pico de correlación, como se puede ver en (5.3)

$$SAM = s_l + s_r \quad (5.3)$$

Donde s_l es la pendiente de la izquierda, y s_r es la pendiente de la derecha del pico de correlación.

5.2 Características de la métrica SAM

Hasta ahora nos hemos referido a la métrica SAM calculada para un pico de correlación ideal, sin multipath ni ruido, y como hemos dicho el resultado de la métrica en este caso es 0.

Si nos imaginamos un escenario real, en el que los picos de correlación están afectados por multipath y por ruido, cuando calculemos las pendientes de las rectas, obtendremos lo siguiente:

$$\begin{cases} slope_l = s_l + s_{multipath_l} + s_{n_l} \\ slope_r = s_r + s_{multipath_r} + s_{n_r} \end{cases} \quad (5.4)$$

Donde $slope_l$ y $slope_r$, son las pendientes que resultan de hacer el cálculo como se explica en 5.1.1, que son igual a la pendiente de cada una de las rectas (s) más una pendiente provocada por el multipath ($s_{multipath}$) y otra provocada por el ruido (s_n).

Si realizamos la suma de ambas pendientes para calcular la métrica SAM, obtendremos que para este caso, no es igual a cero sino a una contribución provocada por multipath y ruido.

$$SAM = SAM_{multipath} + SAM_n \quad (5.5)$$

Si suponemos que estamos estudiando un escenario prácticamente estático, como los que se investigan en este trabajo, la $SAM_{multipath}$ tenderá a un valor constante, diferente de cero si existe multipath, que podemos escribir como $\mu_{multipath}$.

Pero si estudiamos el comportamiento de SAM_n (provocada por el ruido), generando con Matlab, varias secuencias de ruido aleatorio de las mismas características que en la práctica, podemos ver en la figura 5.3, que SAM_n tiene una distribución parecida a una distribución gaussiana, centrada en 0 y cuya varianza variará en función del valor de CNO.

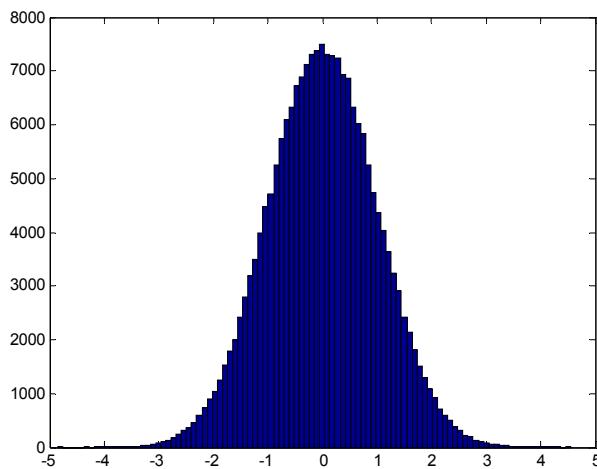


Figura 5.3: Distribución de la componente de la SAM provocada por ruido

De las características de las diferentes partes de la métrica SAM, extraemos que para obtener información acerca del multipath, necesitamos realizar varios cálculos de SAM de diferentes picos de correlación para ver sobre qué valor se centran. Este valor es $\mu_{\text{multipath}}$, que es el indicativo de la presencia de multipath:

- Si no hay multipath: el valor de $\mu_{\text{multipath}}$ será igual a 0, puesto que no existirá $\text{SAM}_{\text{multipath}}$, i debido a que SAM_n se centra sobre 0, la métrica SAM en este caso estará centrada sobre 0. Un ejemplo de esta situación es la figura 5.4.

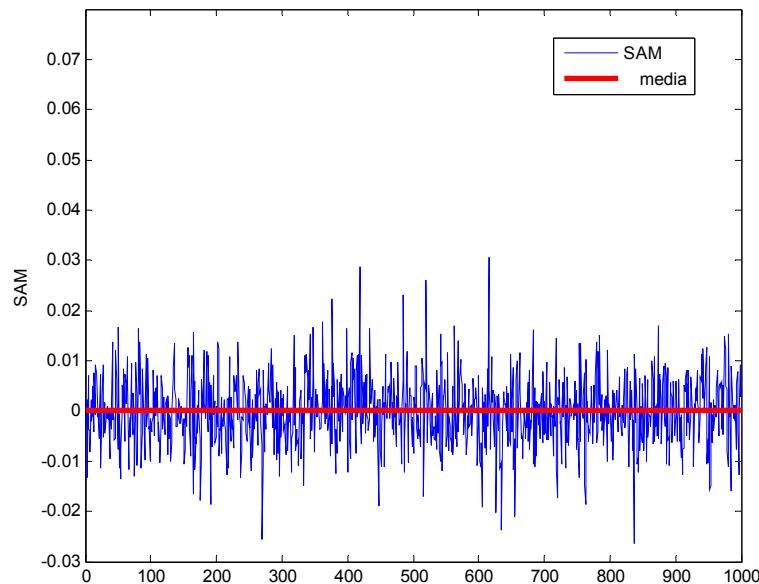


Figura 5.4: SAM de un escenario sin multipath

- Si existe multipath: el valor de $\mu_{multipath}$ es diferente de cero, lo cual, quedará reflejado sobre la media de la SAM, indicando que el satélite sobre el que estamos trabajando está afectado por multipath, como sucede en el caso de la figura 5.5.

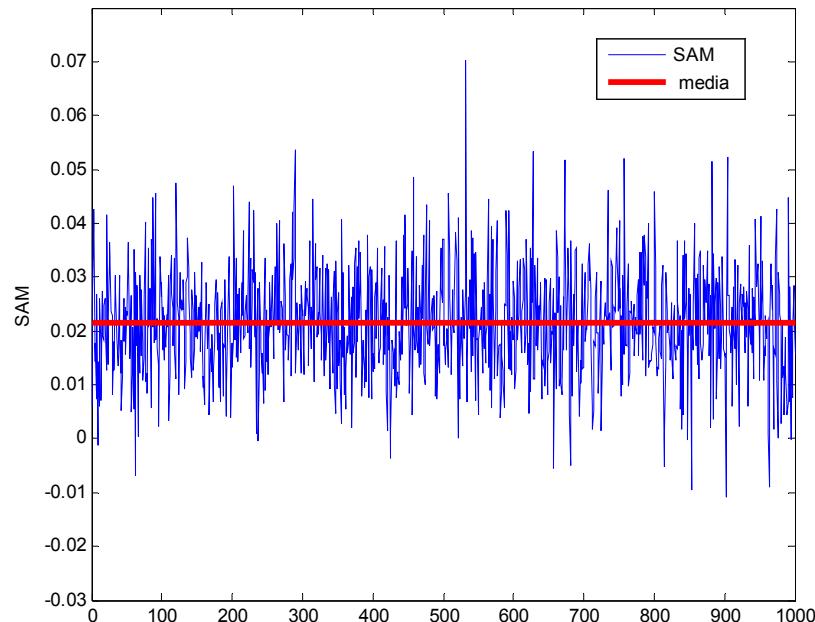


Figura 5.5: SAM de un escenario con multipath

La variabilidad de los valores de la métrica SAM, se deberá únicamente a la contribución del ruido a la hora de calcular la SAM. Si suponemos que en una situación ideal no existe ruido y el canal se mantiene siempre estático, el valor de la SAM calculada será siempre igual a $\mu_{multipath}$.

5.3 Correlación de las muestras de SAM

Una forma de caracterizar la métrica según venga dada por ruido o por multipath consiste en realizar la autocorrelación de diferentes muestras de SAM resultantes de los picos de correlación obtenidos de cada satélite.

El resultado nos indicará cuánto se parecen las muestras de SAM entre sí. En caso de que todas las muestra de SAM tengan el mismo valor, la correlación mostrará un triángulo. Si nos ponemos en el caso contrario, y las muestras no guardan ningún parecido entre sí, lo único que veremos será un pico en el medio de la correlación, mientras que los demás valores serán prácticamente 0.

Esto nos es muy útil, porque la contribución del ruido a la métrica SAM, como sabemos, es aleatoria, y al realizar la correlación de diferentes muestras de una variable aleatoria, el resultado es tan sólo un pico de correlación (figura 5.6 en azul). Sin embargo la SAM provocada por el multipath, es determinista por lo que si el multipath no varía, deberíamos obtener siempre el mismo resultado, lo cual quedará reflejado en la correlación de la métrica SAM (figura 5.6 en verde).

No obstante, en aquellas situaciones en que el nivel de ruido sea muy grande, la contribución del ruido sobre la SAM ocultará los valores de SAM a causa del multipath y no podremos verlos.

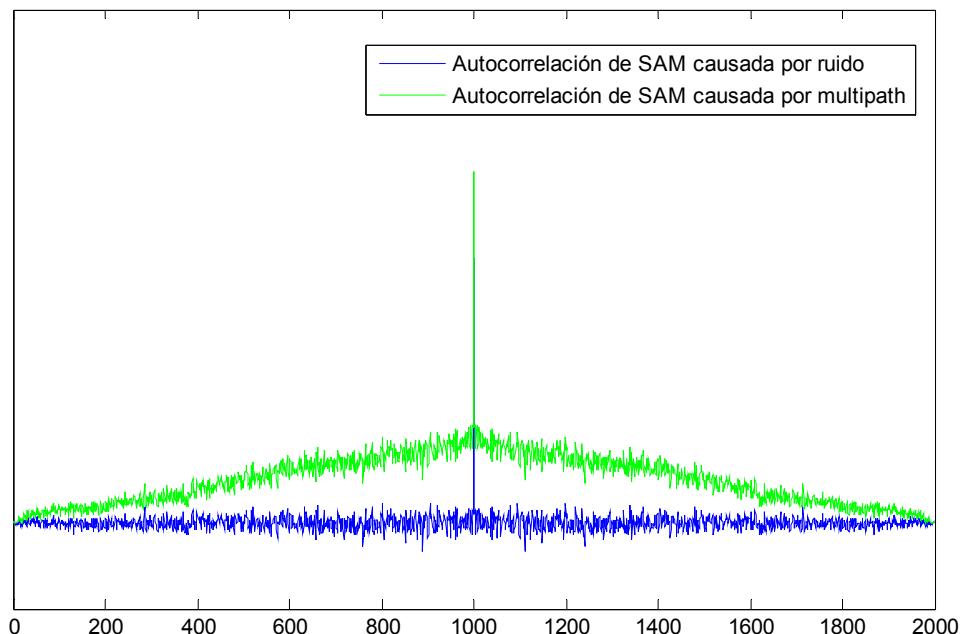


Figura 5.6: Autocorrelación de muestras de SAM

5.4 Clasificación de situaciones con multipath

Por lo que se ha explicado hasta ahora y a la espera de realizar las pertinentes comprobaciones prácticas, podemos afirmar que con la métrica SAM se puede saber si un determinado satélite está afectado por multipath o no.

No obstante, existen ciertas situaciones sobre las cuales el cálculo de SAM, no nos aporta información suficiente, y más que ayudarnos puede hacernos creer que no existe multipath cuando en realidad sí que lo hay.

La tabla 5.1 muestra las situaciones sobre las cuales la SAM puede aportarnos información útil y en cuáles no.

		CNO de la señal		
		Alta (45-35 dBHz)	Media (35-25 dBHz)	Baja (<25 dBHz)
Tipo de multipath	Variable	OK	NO	NO
	Estático	OK	Aumentando tiempo de integración	NO

Tabla 5.1: Comportamiento de la métrica en función del nivel de CNO

Como vemos, existen dos factores que determinan el uso de la métrica SAM, uno de ellos es la potencia de la señal recibida, ya que cuanto menor sea el valor de CNO de la señal, mayor será la dispersión de la SAM. Para poder sacar algo en claro si la potencia de la señal no es alta, tendríamos que aumentar el tiempo de integración. Esto nos puede ayudar la señal se encuentra cerca de los 30 dBHz pero en caso de que la potencia sea menor tendremos que ir aumentando el tiempo de integración, por lo que, podría llegaría un momento en que el multipath del escenario cambiaría y estaríamos comparando dos valores de multipath totalmente diferentes.

El otro factor a tener en cuenta, es la variabilidad del multipath en el escenario que nos encontramos. Lo ideal sería situarnos en un escenario en el que no cambiase nada, como puede ser el movimiento de coches, personas, o del mismo receptor, pero si nos encontramos en un lugar en el que el multipath va cambiando de forma aleatoria, no podremos realizar varios cálculos de SAM puesto que estaremos comparando dos situaciones diferentes. Sin embargo, si la potencia de la señal es muy alta (45-40 dBHz) no hará falta que realicemos más de un cálculo de SAM para, encontrar un muy crecano a la media, ya que la dispersión de la métrica en estos casos es muy baja.

5.5 Simulación con MATLAB del cálculo de SAM

Para comprobar lo estudiado a nivel teórico respecto a la SAM, hemos realizado un script con Matlab (adjunto en el anexo del trabajo) que permite simular la recepción de señal GPS afectada por multipath y de esta manera poder realizar el cálculo de SAM.

Para simular la aparición de multipath hemos utilizado una serie de rutinas de Matlab creadas por el grupo IEEE 802.15 con las cuales es posible generar respuestas de canal siguiendo el modelo estadístico Saleh-Valenzuela [Sal87] para la propagación en escenarios indoor.

Para ello, utilizamos el mismo tiempo de muestreo que utilizamos para la señal GPS, que es $T_s=1\text{ms}/1023/4 = 244,38\text{ ns}$, o lo que es lo mismo, 4 muestras por tiempo de chip, y un mean delay spread de 500 ns como el utilizado en [Gün08] para un escenario indoor. En la figura 5.7 se muestran algunos de las respuestas de canal generadas.

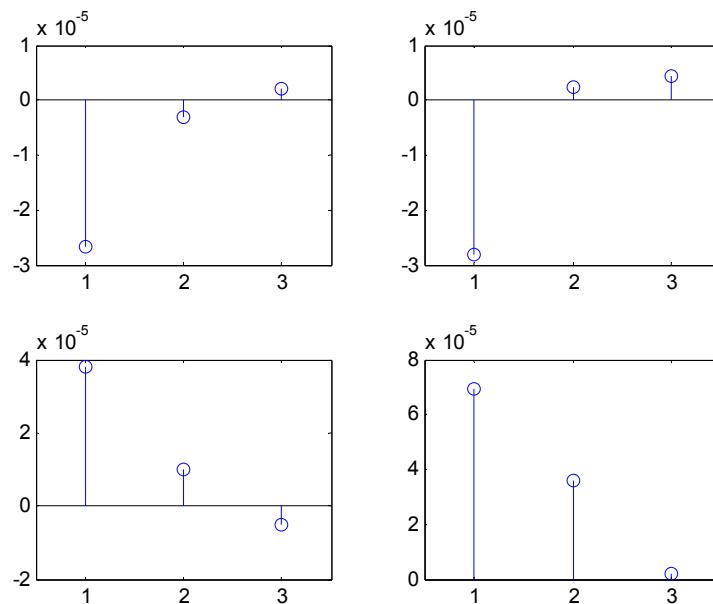


Figura 5.7: Simulación de respuestas de canal con multipath

Aunque no son canales de energía unitaria, posteriormente se modificarán para que no añadan una atenuación extra a la señal artificial recibida.

De esta forma, podemos estudiar algunas de las situaciones comentadas anteriormente sobre la SAM, y ver que, para cada potencia de señal, la métrica se comporta de una manera o de otra. Por ejemplo, podemos ver qué sucede cuando no existe multipath, o como se comportaría la métrica en un escenario ideal sin ruido. De la misma forma podemos estudiar escenarios reales para hacernos una idea de qué forma tendrá la métrica al analizar los resultados prácticos.

5.5.1 Caso ideal sin multipath ni ruido

Si lo comentado hasta ahora es correcto, al calcular la SAM el resultado será igual a 0, puesto que no hay contribución de multipath ni ruido sobre la SAM.

En la figura 5.8 se muestran los resultados para esta simulación. Como decíamos, la SAM (representada con un cuadrado de color negro) calculada para cualquier nivel de potencia es 0. Obviamente esta situación no se dará jamás en la práctica, pero sirve para demostrar, lo comentado en el punto 5.2 sobre las características de la métrica.

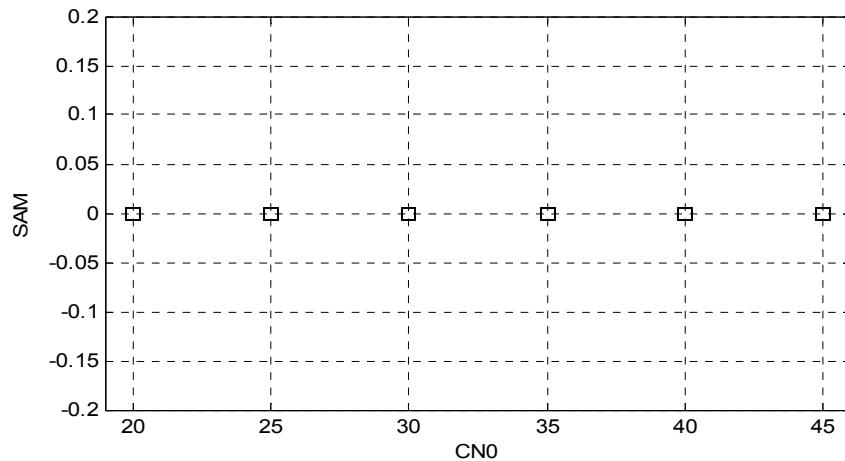


Figura 5.8: SAM en función del nivel de CN0 sin multipath ni ruido

5.5.2 Caso ideal con multipath y sin ruido

En este caso, el valor de la métrica ha de ser igual a lo que antes habíamos llamado $\mu_{\text{multipath}}$ que es el valor resultante de sumar las pendientes izquierda y derecha del pico de correlación, y que para esta situación será diferente de 0, ya que hay multipath. También cabe destacar el hecho de que, para cualquier nivel de potencia, la métrica nos da el mismo valor. Esto demuestra que el causante de la dispersión de la SAM es el ruido y no el multipath, ya que este se mantiene estático.

Para esta simulación hemos escogido una canal al azar entre todos los que hemos generado.

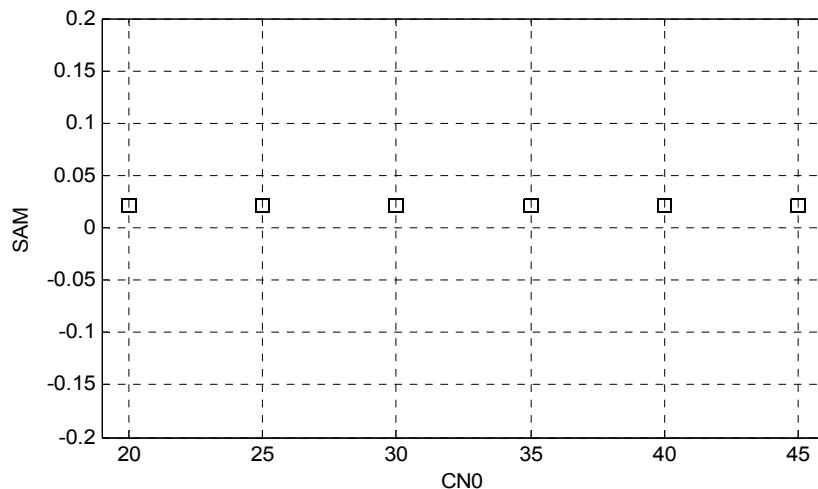


Figura 5.9: SAM en función del nivel de CN0 con multipath y sin ruido

5.5.3 Caso real con ruido y sin multipath

Para la representación de medidas de SAM reales, utilizaremos diferentes histogramas para poder realizar una comparación entre diferentes satélites o diferentes valores de CN0, ya que como veremos en el próximo capítulo, cuando tomamos medidas experimentales, el multipath del escenario puede variar, por lo que, durante el tiempo que estemos observando veremos varios valores de $\mu_{\text{multipath}}$. Por ese motivo, nos interesa saber que tendencia sigue la métrica, ya que recordemos que el hecho de que los valores de ésta no se agrupen alrededor de 0, nos indica la presencia de multipath.

La aparición de ruido provoca que la métrica tenga mayor dispersión a medida que la CN0 de la señal es menor. Debido a que en este caso no existe multipath, la métrica es producto únicamente del ruido, de manera que las distintas muestras de SAM estarán centradas sobre 0 como podemos ver en la figura 5.10.

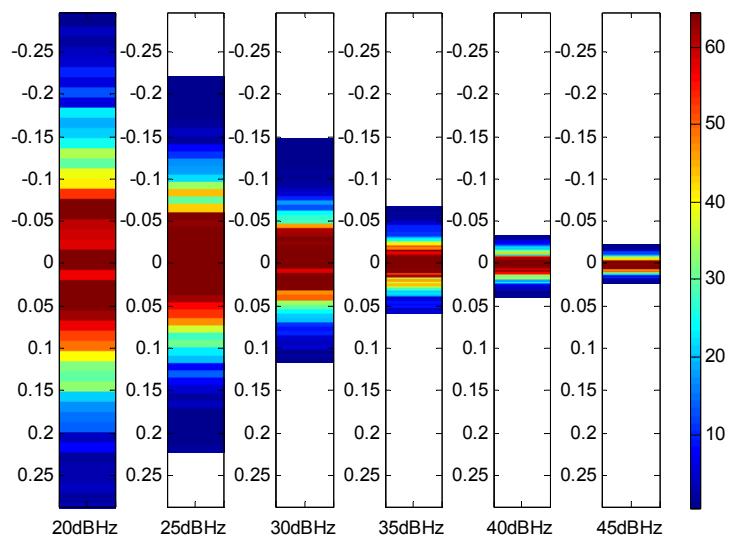


Figura 5.10: SAM en función del nivel de C/N0 sin multipath y con ruido

5.5.4 Caso real con multipath y ruido

En este caso, el resultado de la métrica ha de ser diferente para los distintos valores de señal, puesto que a medida que el nivel de señal es menor, la dispersión de la métrica crece y no somos capaces de diferenciar entre su valor medio. Pero a medida que el valor de la potencia de señal crece, se ve mucho más claro donde se sitúa el valor medio de la métrica.

La figura 5.11 muestra la disposición de las diferentes muestras de SAM para cada valor de potencia.

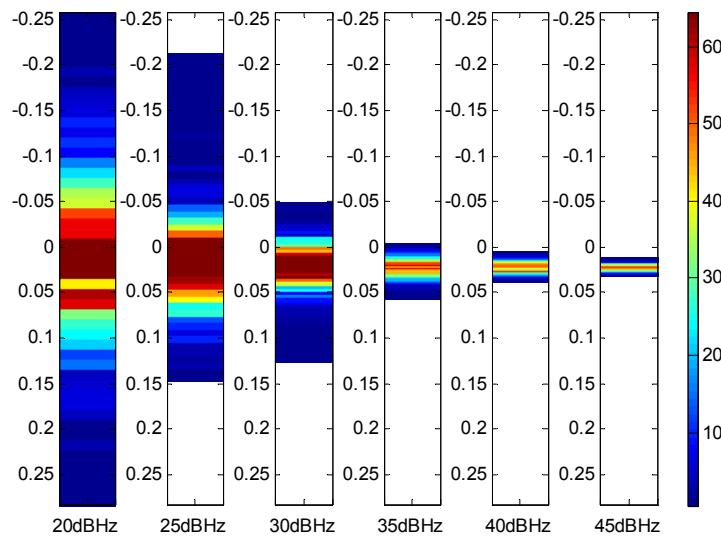


Figura 5.11: SAM en función del nivel de CNO con multipath y ruido

Como vemos, a medida que la potencia de la señal se va haciendo más grande, la dispersión de la métrica disminuye y ésta, se va agrupando entorno a un valor cercano a 0.02. Para esta simulación teórica sí que tiene sentido hablar sobre la media de los valores de SAM, puesto que sabemos que el canal con multipath utilizado es el mismo para todos los cálculos de la métrica. Por eso, podemos representar los valores de las medias en la siguiente tabla:

CNO(dBHz)	20	25	30	35	40	45
Media SAM	0.0045	0.0176	0.0209	0.0209	0.0213	0.0212

Tabla 5.2: Valor medio de la métrica en función del nivel de CNO

5.5.5 Caso real con multipath aleatorio y ruido

Este es uno de los escenarios en que la métrica SAM no puede proporcionarnos información correcta sobre el multipath del entorno, puesto que, para cada realización que calculamos, tendremos un multipath diferente, con lo que no podremos saber sobre qué valores se está centrando.

Esta es una situación típica de escenarios indoor como oficinas, o centros comerciales, en los que debido al desplazamiento de personas, objetos o al mobiliario del entorno, el multipath del canal irá variando.

Los resultados pueden observarse en la figura 5.12. Como hemos dicho los valores de SAM han ido cambiando mientras eran calculados, y, como consecuencia, se van centrando sobre 0, lo cual no indica que no haya multipath.

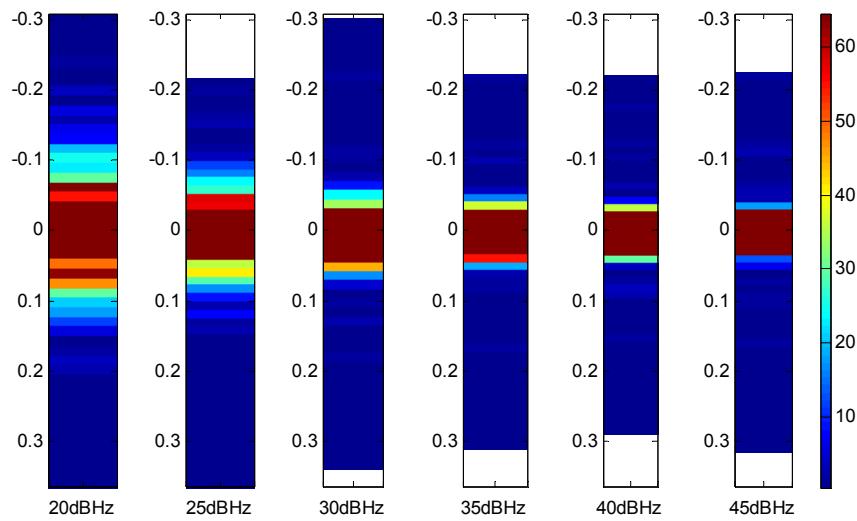


Figura 5.12: SAM en función del nivel de CN0 con multipath aleatorio y ruido

Como dijimos anteriormente, al clasificar los escenarios en función de la potencia recibida, si la señal en estos casos fuese suficientemente alta ($>40\text{dBHz}$) no tendríamos problemas para suponer que el valor del multipath es el obtenido al calcular una sola vez la SAM, ya que la contribución del ruido sobre la SAM, en este caso, sería prácticamente nula. Pero en los escenarios en que el multipath va cambiando tan rápidamente la potencia de la señal recibida, suele ser bastante baja como vimos en la tabla 4.1.

6. Medidas Experimentales

6.1 Set-up

Los datos de la señal GPS utilizados en este apartado para analizar la métrica SAM han sido grabados con el software receptor GPS y de procesado en tiempo real, NordNav 3.6.1.

El hardware utilizado para captar la señal consta de dos elementos, uno de ellos es una antena convencional encargada de recibir la señal en la banda L1 (1575.42MHz Hz), la cual pasará al segundo elemento de hardware, un front-end NordNav, encargado de realizar un filtrado paso banda de la señal (con un ancho de banda de 2MHz), bajarla a una frecuencia intermedia (IF) de 4,1304 MHz y convertir la señal analógica a digital con una tasa de muestreo de 16,3676 MHz. Otro dato a tener en cuenta a la hora de realizar la conversión A/D, es el número de bits utilizados para cuantificar cada muestra, este número puede escogerse, gracias al receptor software de NorNav. En nuestras medidas, hemos escogido 4 bits por muestra.

El front-end se encuentra conectado a un ordenador vía USB, lo cual nos permite poder guardar los datos en su disco duro para poderlos procesar posteriormente con un software receptor de alta sensibilidad programado en Matlab. Los datos extraídos de este software nos servirán para analizar la métrica propuesta en el capítulo anterior.



Figura 6.1: Material utilizado para capturar las medidas experimentales

6.2 Medidas experimentales

6.2.1 Escenario: Ventana Laboratorio

El escenario sobre el cual hemos estado trabajando se encuentra en una de las ventanas del laboratorio de comunicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSE) de la Universidad Autónoma de Barcelona.

Podemos ver la situación del escenario en la figura 6.2, marcada con un punto de color rojo.



Figura 6.2: Imagen del escenario de las medidas experimentales

En frente del laboratorio no hay ningún edificio que impida la visión del cielo desde el lugar donde situamos la antena, por lo que deberíamos ver perfectamente una mitad del firmamento, mientras que la otra nos quedara oculta por nuestro edificio.

En la figura 6.3 podemos ver en qué lugar estaba situada la antena receptora para capturar la señal GPS analizada en este capítulo.



Figura 6.3: Situación de la antena receptora

Los datos de este escenario, y del momento de la captura de la señal GPS utilizada para el análisis, se pueden ver con más detalle en la siguiente ficha técnica:

Posición	Latitud	41.500560°
	Longitud	2.1146640°
	Altura	284.855 m
Fecha GPS	Semana GPS	1525
	Hora GPS	310837
Listado Satélites	[2, 4, 7, 8, 10, 11, 13, 16, 17, 20, 23, 25, 31, 32]	
Duración Datos	600 s	
Intervalo integración no-coherente	600 ms	

A partir de un archivo RINEX de navegación [4] del Institut Cartogràfic de Catalunya [3], correspondiente a la fecha en que fueron tomadas las medidas, pasamos al software de procesado información sobre los 14 satélites que se encontraban en ese momento en el cielo, que juntamente con la fecha y la posición de referencia en que se tomaron las medidas, podemos calcular su situación en el espacio:

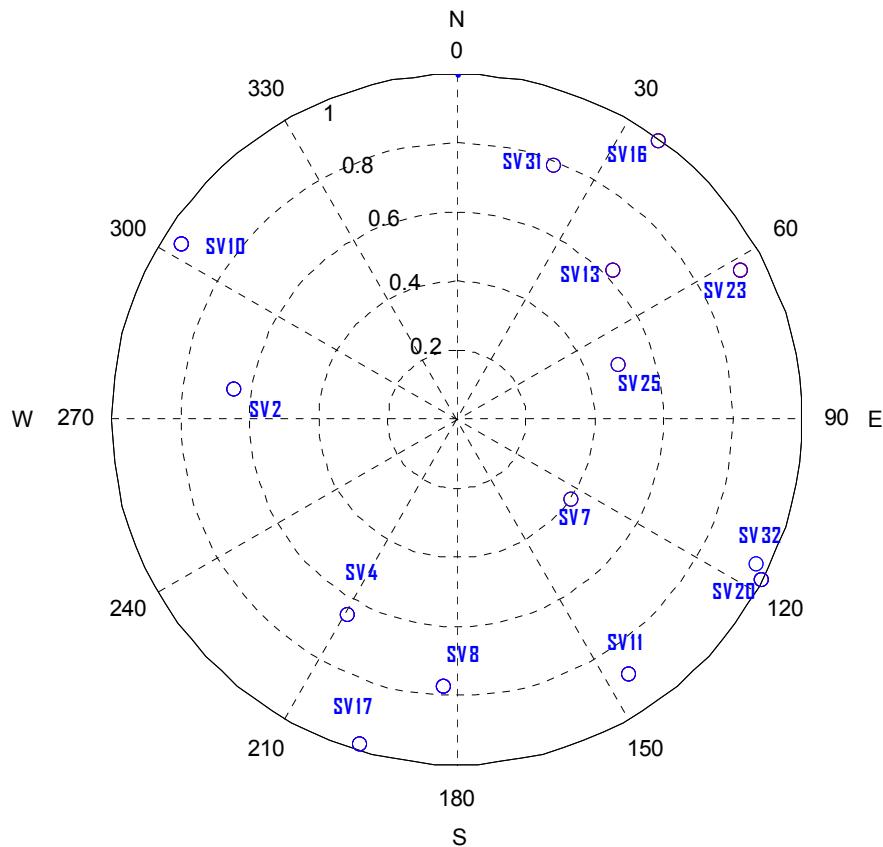


Figura 6.4: Constelación de los satélites a estudiar

Como podemos ver, existen satélites sobre los cuales el receptor no tiene visión directa, por culpa de los edificios de los alrededores. Por este motivo, la señal de estos satélites llegará muy atenuada y reflejada desde otros lugares.

A partir del mapa y con los diferentes niveles de CNO para cada satélite, podríamos hacer una primera distribución entre los diferentes satélites según se encuentren en visión directa o no (Tabla 6.1).

SV	2	4	7	8	10	11	13	16	17	20	23	25	31	32	Satélites en visión directa
CNO (dBHz) (valor medio)	26	29	31	25	24	28	42	34	28	28	30	41	26	27	Satélites sin visión directa

Tabla 6.1: Tipo de visión para cada satélite

Al mirar el mapa de la constelación de los satélites, podríamos pensar que el satélite 31 se encuentra en visión directa. Pero si nos fijamos en su nivel de CNO (26 dBhz), es posible que este satélite se encuentre situado por detrás de alguno de los edificios de la escuela de

ingeniería (figura 6.2) y que, por lo tanto, no se encuentre en visión directa. Lo mismo sucede con los satélites 20 y 32, aunque en esta ocasión es posible que el propio edificio donde fueron tomadas las medidas, ocultase a los satélites.

Una vez hemos procesado todos los datos con un tiempo de integración no coherente de 600 ms, obtenemos 1000 picos de correlación resultantes para cada satélite, sobre los que tenemos que estudiar el efecto de la métrica, que puede ser representada en forma de histograma en la siguiente figura:

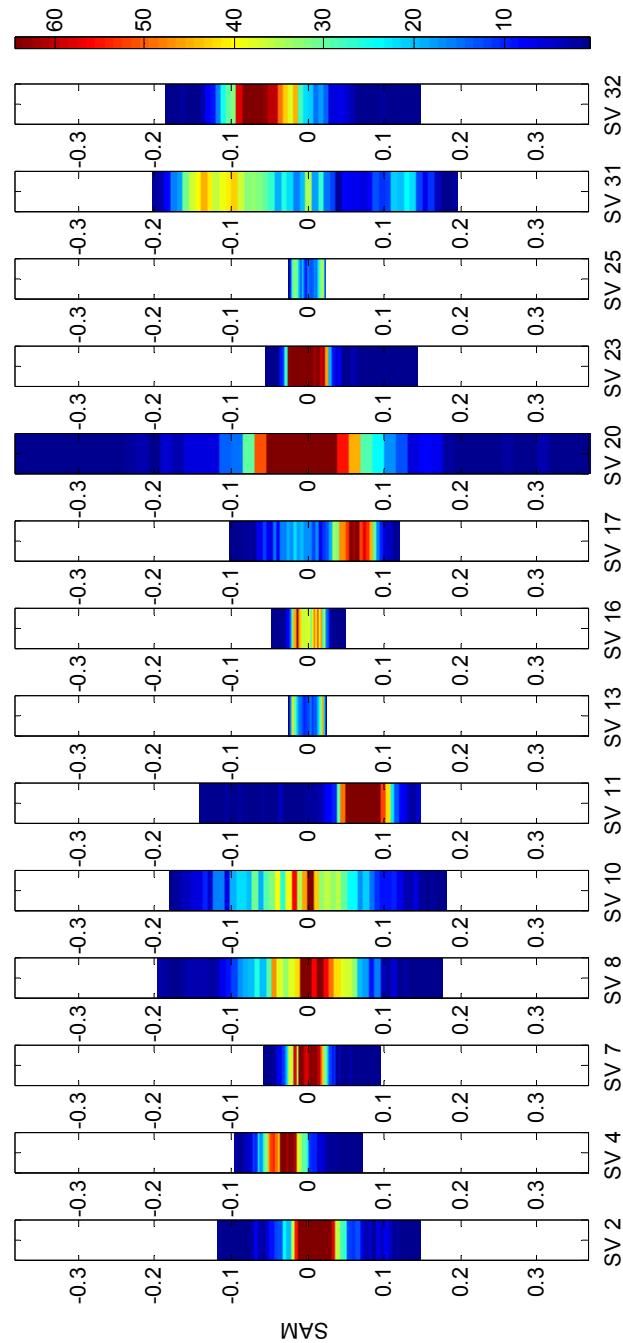


Figura 6.5: Histogramas de la métrica SAM para cada satélite

Podemos ver como la dispersión de la métrica para cada satélite es diferente, seguramente debido al nivel de CNO, aunque, posteriormente, estudiaremos cada caso con más detalle. También se puede observar como en varios casos la SAM tiende a localizarse en torno a un valor determinado, lo cual, como sabemos, puede ser indicativo de multipath. En esta situación se encuentran los satélites 4, 11, 17, 31 y 32.

A continuación, estudiaremos el funcionamiento de la métrica SAM sobre cada uno de los satélites del escenario descrito. Como hemos comentado hasta ahora, si un determinado satélite reúne las condiciones idóneas para que la métrica funcione correctamente, podremos saber si la señal de dicho satélite se encuentra afectada por multipath.

Satélite 2:

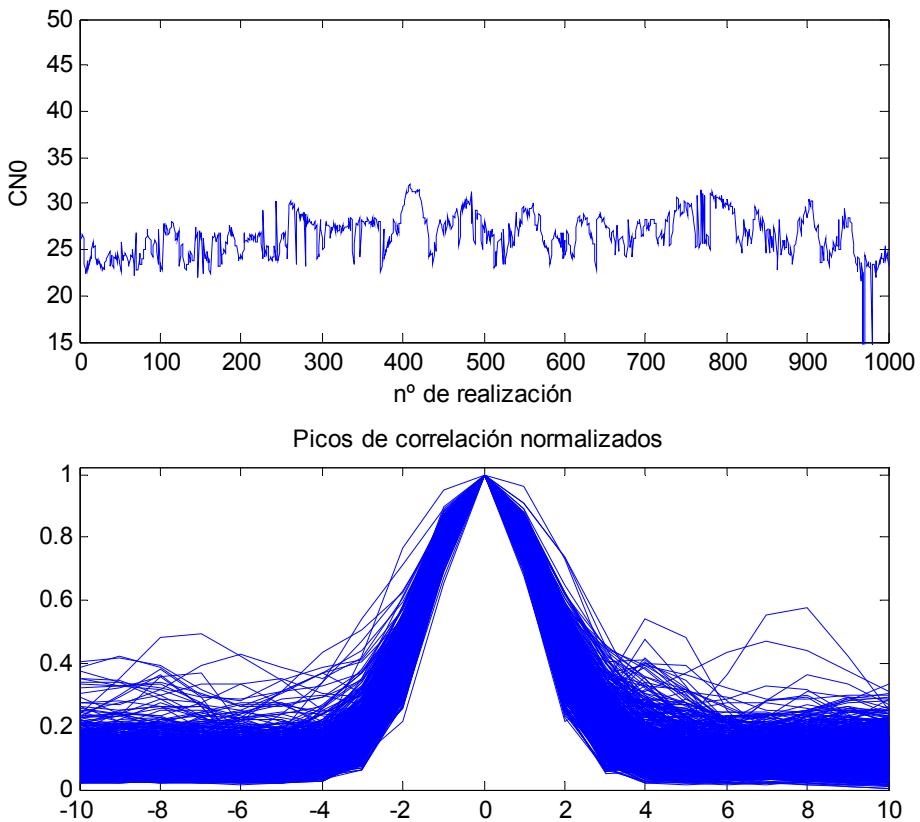


Figura SAT2.1: Nivel de CNO y picos de correlación del satélite 2

Como podemos ver en la primera figura, el satélite 2 tiene una CNO que oscila alrededor de los 26dBHz, que representa un nivel de señal medio, según definimos en la tabla 5.1, lo que puede provocar que en caso de que el multipath que estemos viendo no se mantenga estático, el

valor sobre el cual se centra la métrica SAM sea 0, indicándonos que no existe multipath cuando en realidad sí que lo hay.

Si calculamos la métrica SAM para los diferentes picos de correlación y los representamos en un histograma, como en la figura SAT2.2, podemos ver como la métrica tiende a centrarse sobre 0.

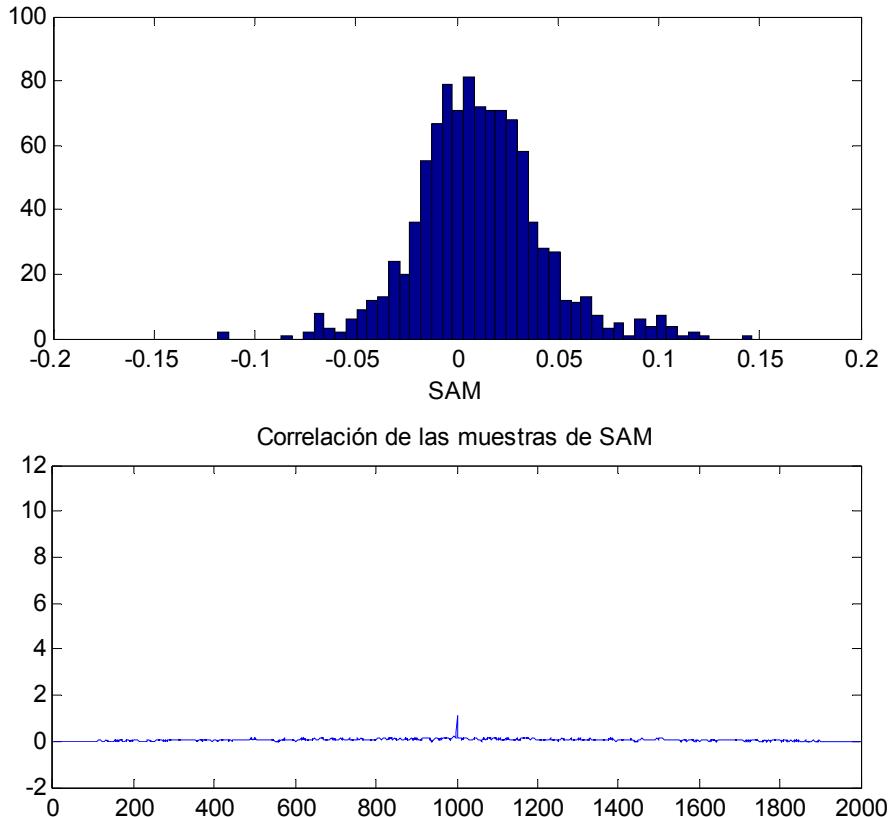


Figura SAT2.2: Histograma de la métrica del satélite 2 y correlación de las muestras de SAM

Como se ve en la correlación de las muestras de SAM de la figura SAT2.2, no hay parecido entre muestras, por lo que observamos una correlación igual a 0, excepto en el punto medio donde se aprecia un pequeño pico.

Con lo que hemos dicho hasta ahora sobre la métrica SAM y los datos que extraemos del satélite 2, podemos decir que o bien no existe multipath, o bien el nivel de ruido es demasiado alto como para que la métrica funcione correctamente.

Si nos fijamos en la constelación de satélites (figura 6.4), vemos que el satélite 2 se encuentra en una situación de visión no directa, lo cual debería verse reflejado en la métrica. Sin embargo, el ruido es demasiado grande en comparación con la aportación del multipath y, por eso, vemos que la métrica está centrada sobre 0.

Por lo tanto, en el caso del satélite 2 debemos decir que la métrica SAM no nos aporta indicios suficientes para decidir si existe, o no, multipath.

Satélite 4:

El satélite 4 tiene una CNO media de unos 29 dBHz, que lo sitúa en un nivel de señal medio según la tabla 5.1.

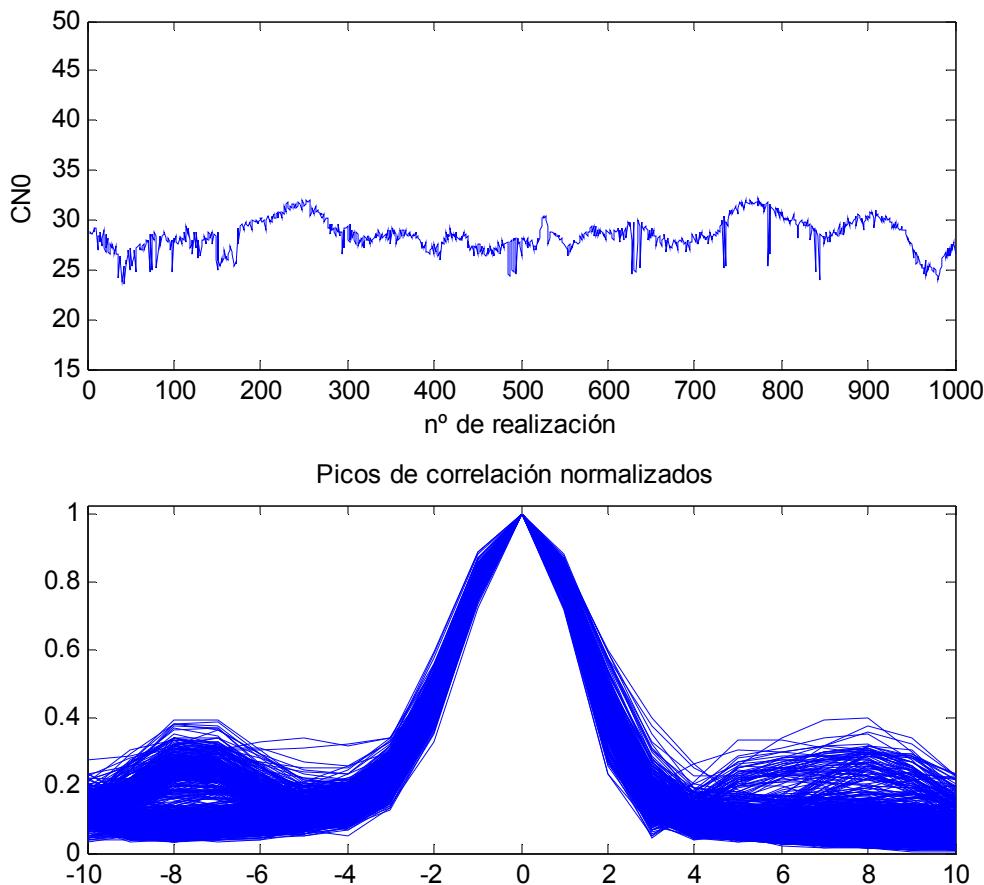


Figura SAT4.1: Nivel de CNO y picos de correlación del satélite 4

Si nos fijamos en la forma que tienen los picos de correlación (Figura sat4.1), podemos observar como estos no acaban de tener una forma simétrica respecto al pico máximo, sino

que los dos laterales son ligeramente diferentes, lo cual debería verse reflejado en la métrica SAM. Además, esta asimetría de la que hablamos, puede verse en todos los picos de correlación obtenidos, lo que indica que si existe multipath, este se ha mantenido fijo durante gran parte de la observación.

El cálculo de SAM, confirma lo que hemos estado diciendo. Como puede verse en el histograma de la figura sat4.2, la métrica tiende a situarse en torno a un valor cercano a -0.03 y no en 0 como sucedió con el satélite 2.

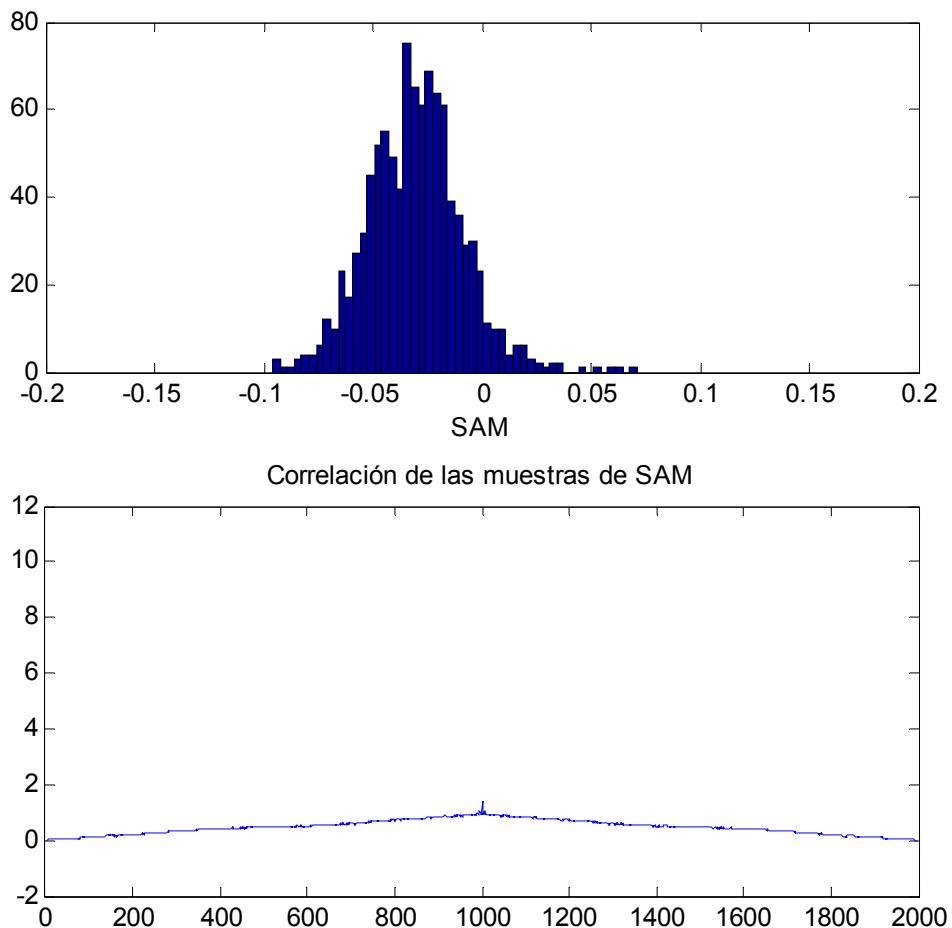


Figura SAT4.2: Histograma de la métrica del satélite 4 y correlación de las muestras de SAM

Además, la correlación de todas las muestras de SAM, refleja que existe un cierto parecido entre ellas. Esto nos puede llevar a confirmar, según lo estudiado hasta ahora, que el satélite número 4 se encuentra afectado por multipath.

Si recordamos las características del satélite número 2, veremos que guardan un cierto parecido con las del satélite 4, ambos tienen un nivel de señal entorno a los 30 dBHz, y en el mapa en que se muestra la situación de los satélites (figura 6.4) parecen estar a la misma distancia del receptor, sin embargo, al realizar el cálculo de la SAM para cada satélite vemos la diferencia entre ambos casos. Si realizamos una comparación de ambas correlaciones de la métrica SAM, observamos claramente como la relación entre muestras SAM del satélite 2 es totalmente aleatoria, mientras que las muestras SAM del satélite 4 tienen un cierta relación entre ellas:

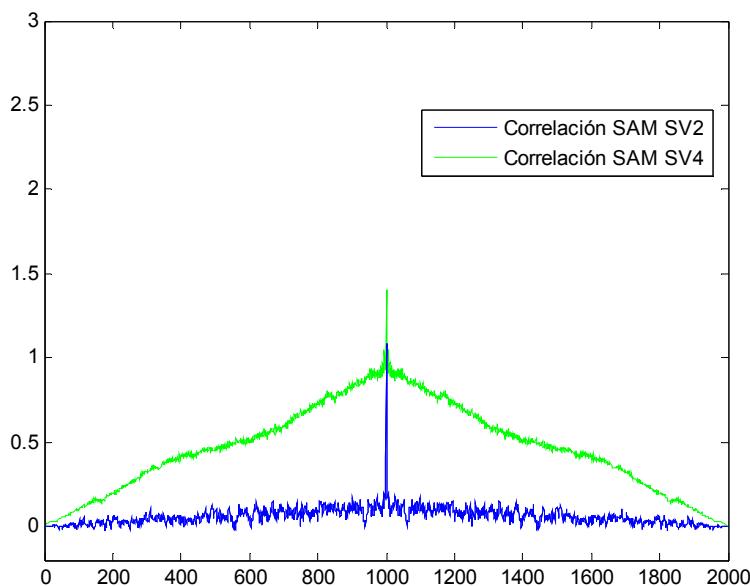
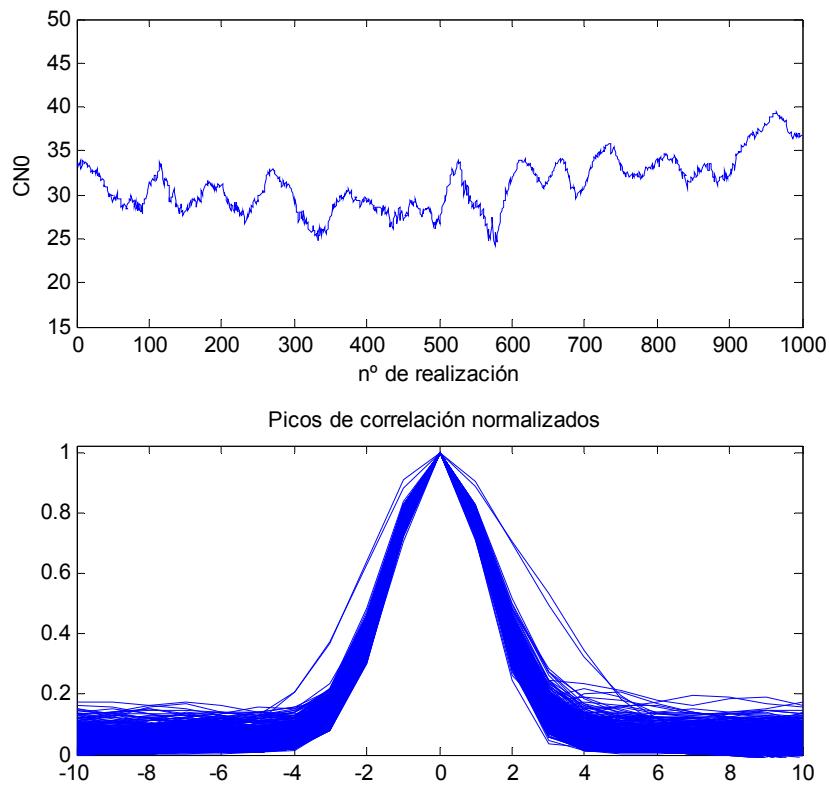


Figura SAT4.3: Comparación de la SAM de los satélites 2 y 4

Nos llama la atención que, a pesar de que el satélite 2 y el 4 se encuentran, aproximadamente, a la misma distancia del receptor, la métrica no es capaz de detectar multipath en el caso del satélite 2 pero sin embargo sí el caso del 4.

Esto puede deberse a que en la dirección en que se encuentra el satélite 2, hay más edificios obstaculizando la señal que en la dirección del satélite 4, como consecuencia puede provocar una mayor atenuación en la señal y que, además, el multipath no permanezca estático.

Satélite 7:**Figura SAT7.1: Nivel de CNO y picos de correlación del satélite 7**

La CNO del satelite 7 se encuentra en torno a los 33dBHz. Como vemos en la imagen sat7.1, llega a tener valores de hasta 39 dBHz, lo que le sitúa como un satelite con un nivel de señal entre alto y medio (tabla 5.1). Como puede verse en los picos de correlación normalizados, existe un buen margen entre el pico de correlación maximo y el nivel de ruido.

Además, podemos observar como existe una gran simetria entre los laterales del pico de correlación que queda reflejado en el histograma de la métrica SAM de la figura sat7.2, donde las diferentes muestras de SAM se sitúan en torno a 0.

Para acabar de confirmar la inexistente relación entre las muestras de la métrica, nos fijamos en su correlación, la cual nos indica que no guardan relación entre sí y, como sabemos, esto es debido únicamente al efecto del ruido sobre la métrica, descartando de esta manera la aparición de multipath sobre la señal.

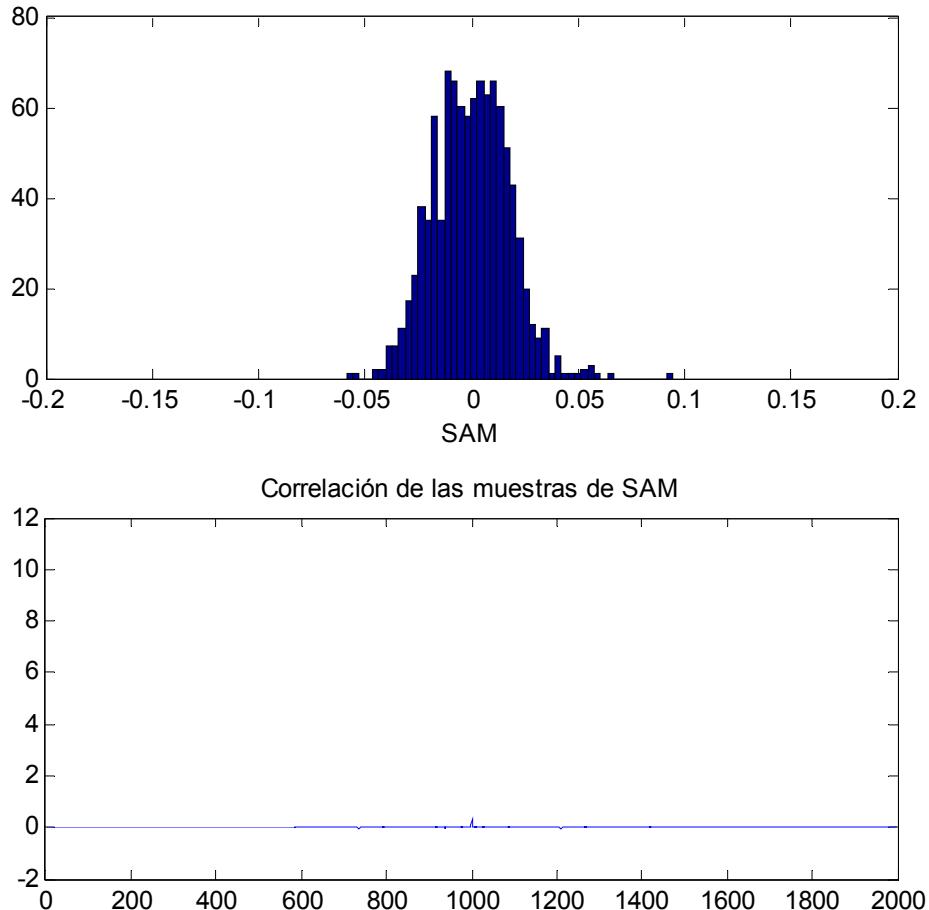


Figura SAT7.2: Histograma de la métrica del satélite 7 y correlación de las muestras de SAM

Los resultados obtenidos, parecen coincidir con la suposición hecha en la tabla 6.1, en la que decíamos que el satélite 7 se encontraba en una situación de visión directa y que, por lo tanto, no existía multipath.

Satélite 8:

El satélite número ocho tiene una CN0 que ronda los 25 dBHz, por lo que éste es uno de los casos comentados en la tabla 5.1. En los que debido al gran nivel de ruido de la señal, no podemos saber si la métrica está funcionando correctamente, ya que los picos de correlación, como vemos en la figura sat8.1, están muy distorsionados y apenas se puede distinguir entre el pico máximo y el ruido. De la misma forma, tampoco podemos distinguir una asimetría clara en el pico de correlación.

De hecho, si nos fijamos en el grafico de potencia de la señal, en función de cada realización, vemos como hay ocasiones en que no nos ha sido posible adquirir correctamente la señal con el tiempo de integración utilizado.

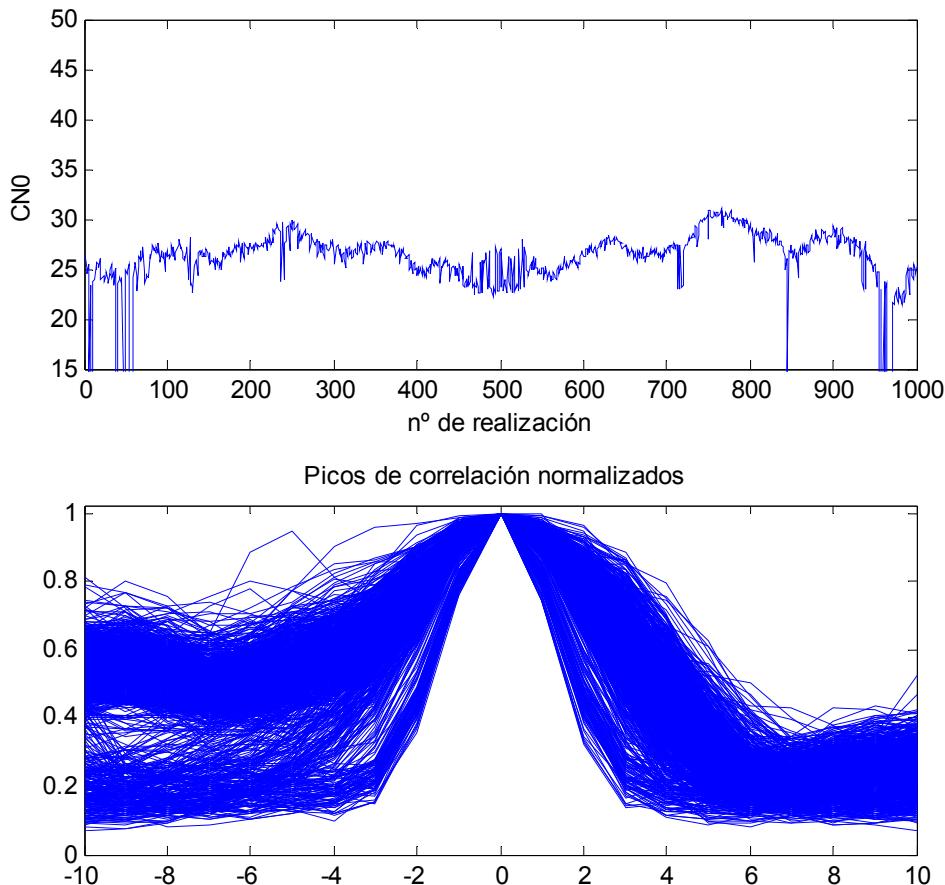


Figura SAT8.1: Nivel de CNO y picos de correlación del satélite 8

Si realizamos el cálculo de la métrica para los picos de correlación del satélite 8, podemos observar como ésta tiene una gran dispersión (entre -0.15 y 0.15), además, como podemos observar en la figura sat8.2, la mayoría de las muestras de SAM están localizadas en torno a 0. Como hemos comentado, si la potencia de la señal fuese mayor, podríamos afirmar con los datos que tenemos de este satélite, que no existe multipath. Pero al tener un nivel de ruido tan alto, es posible que exista multipath pero el nivel de ruido oculta la asimetría de los picos de correlación.

Observando la figura 6.4, apreciamos que el satélite 8 no se encuentra en visión directa con el receptor, por lo que deberíamos ver como la métrica está centrada sobre un valor distinto de 0 (indicando la aparición de multipath), pero debido al nivel de ruido esto no es así.

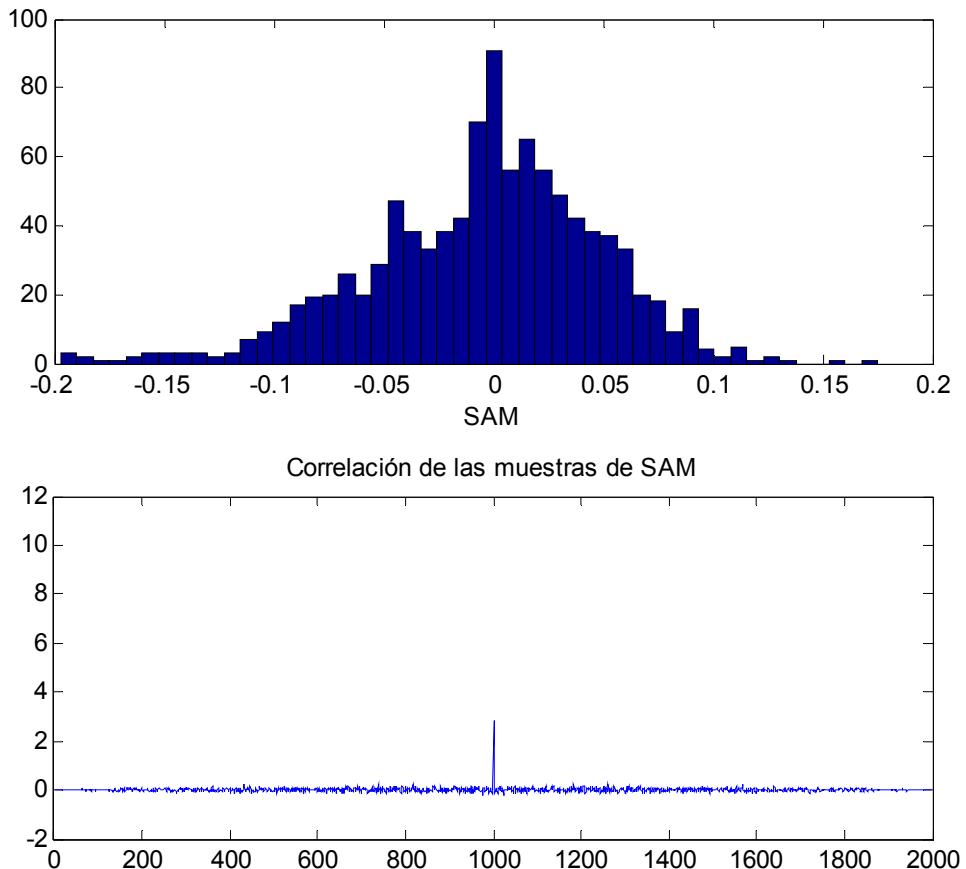


Figura SAT8.2: Histograma de la métrica del satélite 8 y correlación de las muestras de SAM

En el caso del satélite 8, no podemos utilizar la métrica para la detección de multipath, ya que si utilizamos los resultados como lo hemos hecho con otros satélites, deberíamos decir que no existe multipath, cuando dichos resultados se encuentran claramente modificados por el nivel de ruido.

Satélite 10

El satélite 10 se encuentra en la misma situación que el satélite 8, ya que también tiene un nivel de señal bajo, incluso menor que el satélite 8 porque, en esta ocasión, la CNO ronda los 24 dBHz.

Éste es el satélite que se encuentra peor situado respecto al receptor (figura 6.4), ya que la señal ha de atravesar una gran cantidad de obstáculos hasta ser recibida. Esto se traduce en una gran atenuación de la señal y un multipath muy variable, lo que nos impedirá determinar la existencia de multipath con la métrica.

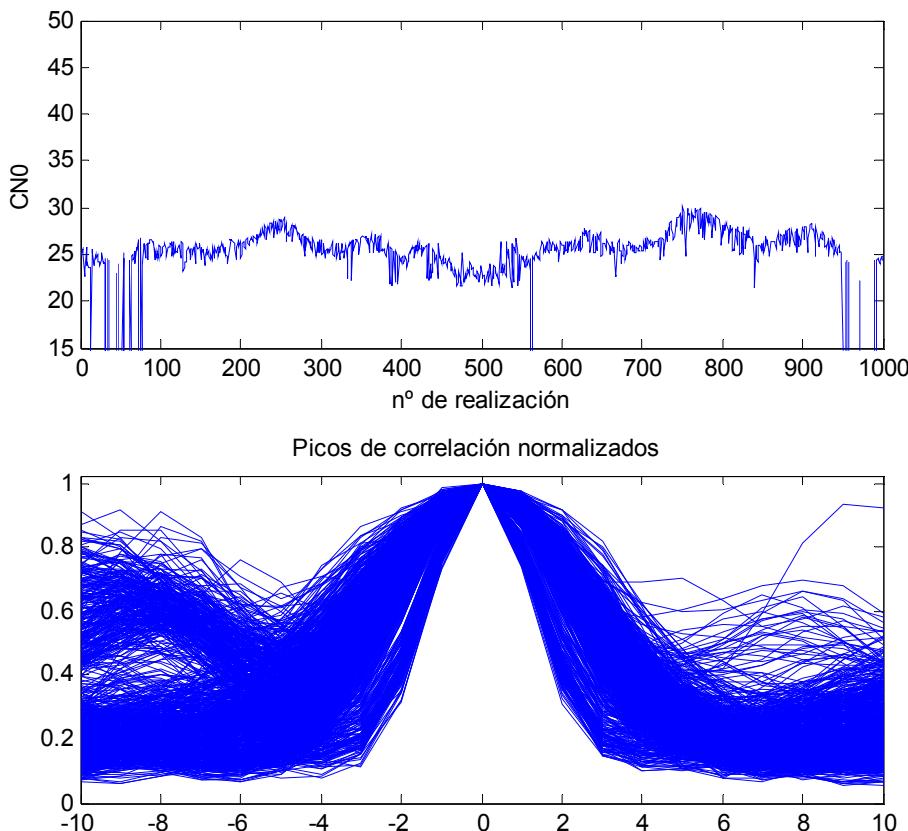


Figura SAT10.1: Nivel de CNO y picos de correlación del satélite 10

Como podemos ver en la figura sat10.2, la métrica SAM tiene una clara distribución aleatoria en torno a 0, donde se localizan la gran mayoría de muestras. Esto no nos sirve para descartar el multipath, debido al bajo nivel de señal (como hemos dicho durante el estudio previo de la métrica).

La correlación de las muestras de SAM demuestra que, en caso de que exista multipath, este es un multipath que ha ido variando durante el tiempo de observación y que, ni siquiera, guarda un cierto parecido entre sí.

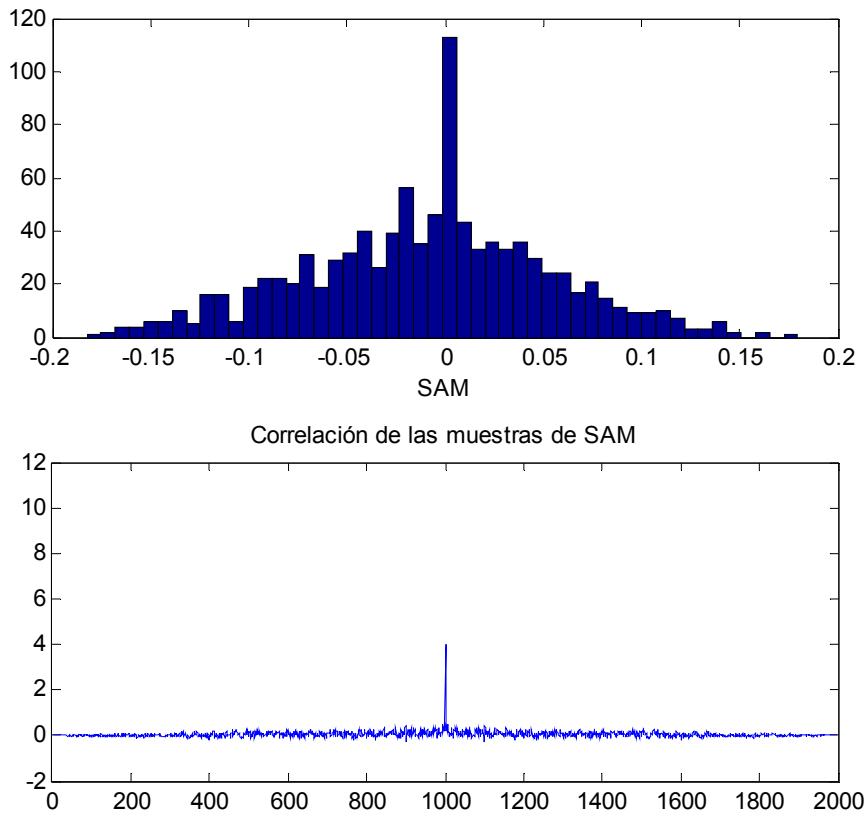


Figura SAT10.2: Histograma de la métrica del satélite 10 y correlación de las muestras de SAM

Satélite 11:

El satélite número 11 tiene una potencia media algo menor que 30dBHz, lo que le sitúa como un satélite con un nivel de señal medio (tabla 5.1). Según lo que hemos estudiado en caso de que exista multipath estático, la métrica SAM será capaz de detectarlo.

Si nos fijamos en la forma que tienen los picos de correlación del satélite 11, que se muestran en sat11.1, podemos ver como una gran cantidad de picos tienen una forma diferente de lo que esperábamos en la parte derecha, por ese motivo, hemos ampliado esa zona y la hemos colocado en la figura sat11.2.

En ella, podemos ver que esa forma que tenían los picos de correlación es consecuencia de las réplicas provocadas por el multipath de la señal, ocasionando, como puede observarse en la figura sat11.1, una clara asimetría en el pico de correlación.

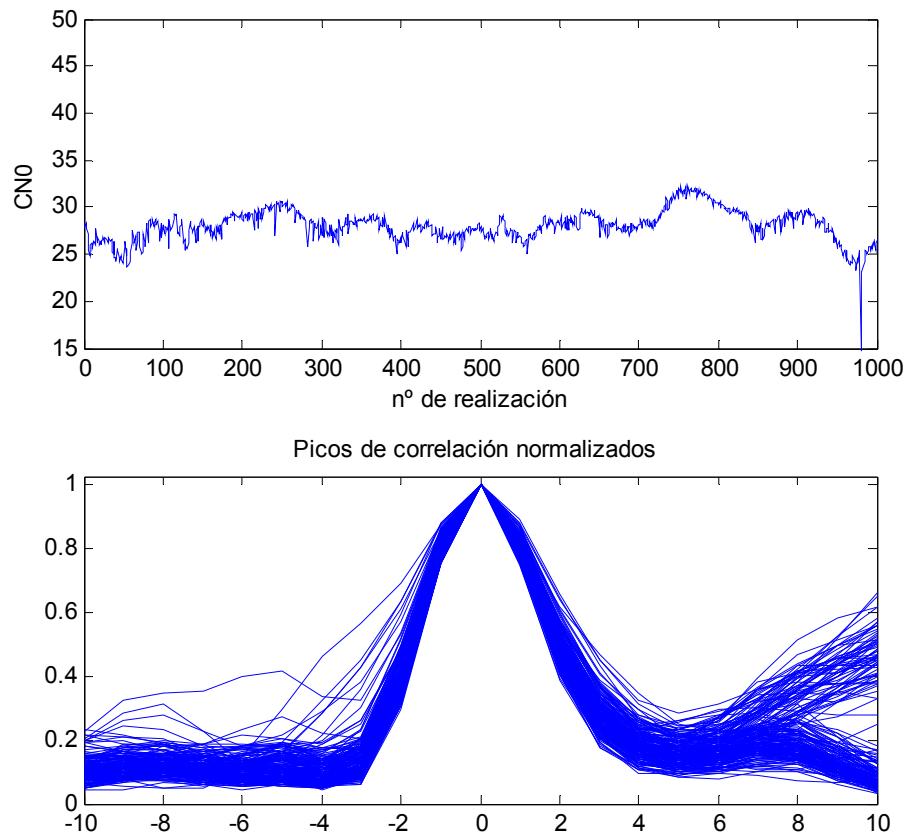


Figura SAT11.1: Nivel de CN0 y picos de correlación del satélite 11

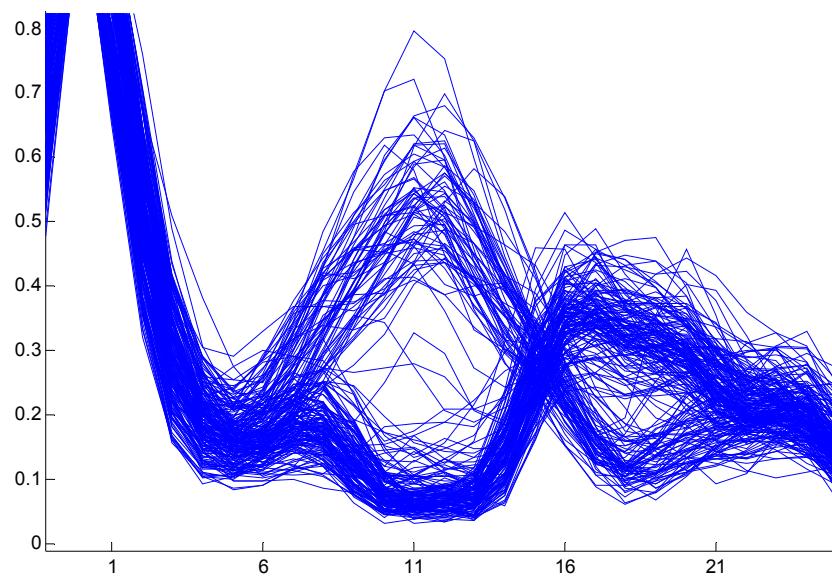


Figura SAT11.2: Consecuencia del multipath sobre los picos de correlación.

Si calculamos la métrica SAM y la representamos en el histograma de la figura sat11.3, podemos ver como existe una clara asimetría en los picos de correlación, lo cual, como hemos visto antes, está claramente provocado por multipath.

Por lo que podemos observar, la métrica para el satélite 11 no tiene una gran dispersión (ya que no tiene un gran nivel de ruido) y, además, los valores de la métrica están centrados sobre un valor diferente de 0 (cerca de 0.07), indicando la clara asimetría de los picos.

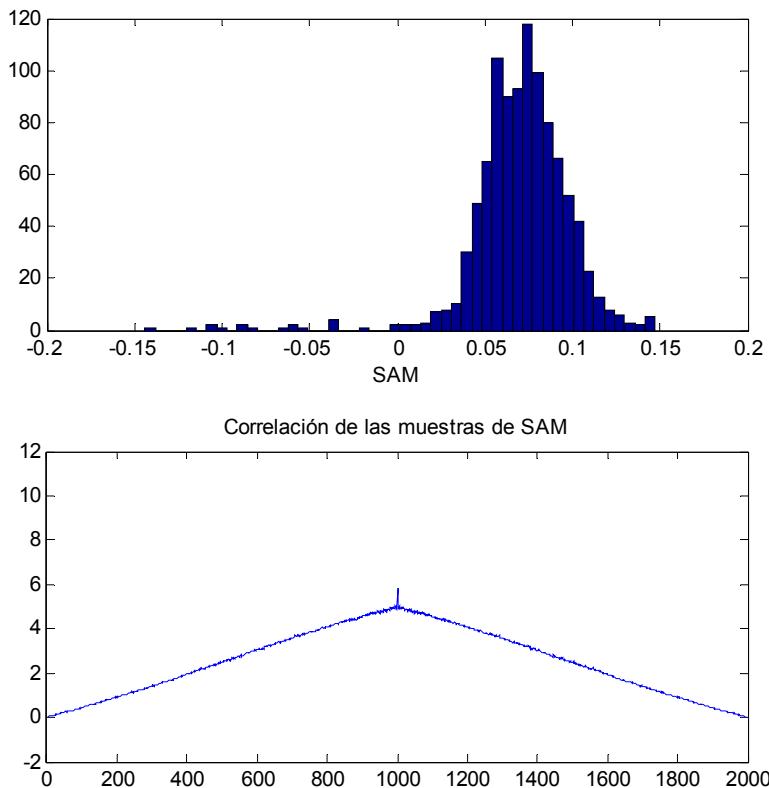


Figura SAT11.3: Histograma de la métrica del satélite 11 y correlación de las muestras de SAM

La correlación de las muestras de SAM indica como, claramente, hay una relación entre todas ellas, demostrando que no se trata de una variable aleatoria como lo sería si la métrica estuviese ‘contaminada’ por el ruido.

Hasta el momento, este es el caso en el que queda más claro el efecto del multipath sobre la métrica SAM y de la utilidad de la misma, ya que con lo estudiado hasta ahora, podemos confirmar que el satélite número 11 se encontraba afectado por multipath en el momento en que tomamos las medidas del escenario.

Si nos fijamos en la figura 6.4 y en los picos de correlación de del satélite 11, es probable que la señal del satélite rebote en uno de los edificios de la escuela de ingeniería y llegue, posteriormente, al receptor, lo que explicaría el pico que se observa a la derecha de los picos de correlación de la señal (figura sat11.2).

Satélite 13:

La CNO del satélite 13 es bastante alta, como podemos ver en la figura sat13.1, ya que varía entre los 43dBHz, por lo que sería muy extraño que la señal de este satélite estuviese afectada por multipath. Recordemos que al ‘rebotar’ la señal en otro objeto y llegar al receptor, se produce una atenuación que afectaría al nivel de señal.

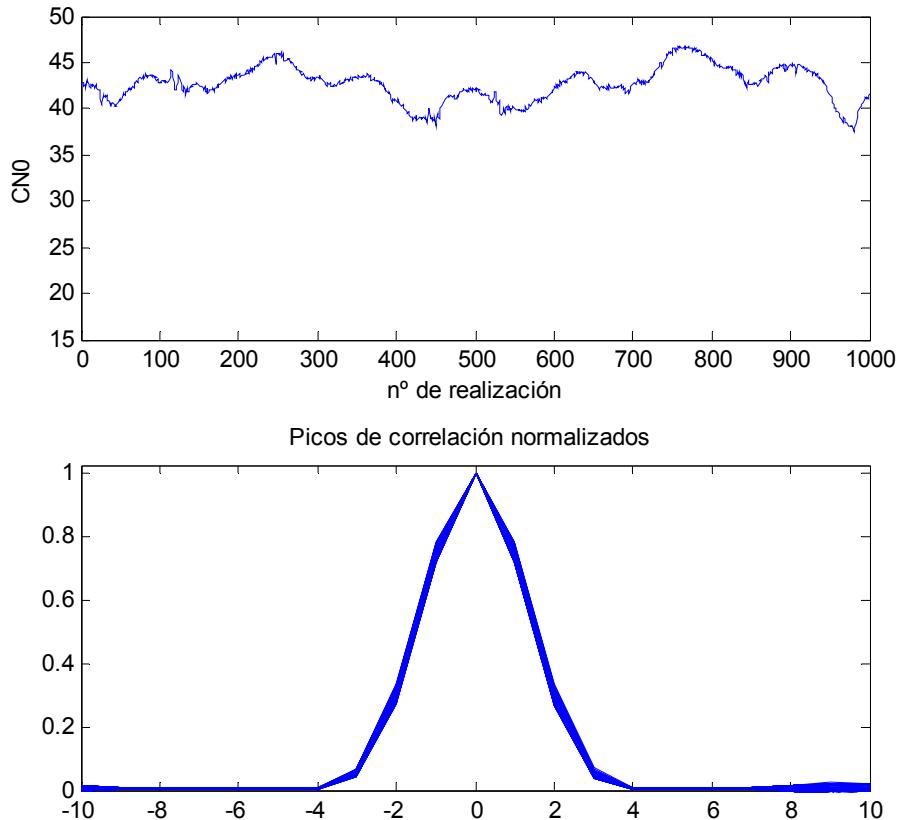


Figura SAT13.1: Nivel de CNO y picos de correlación del satélite 13

Si nos fijamos en los picos de correlación de la figura sat13.2, podemos ver la gran simetría que existe entre ambos laterales del pico máximo, por lo que al calcular la métrica, los valores resultantes estarán centrados en 0, puesto que parece que no existe multipath. Además, el nivel de ruido es tan bajo que la dispersión de la métrica ha de ser muy pequeña.

Si representamos en un histograma las muestras de SAM, vemos como los valores resultantes están distribuidos de tal forma que aparecen dos tipos de multipath diferentes, aunque de un valor medio muy pequeño. Esto se debe a que las réplicas de la señal principal, producto del multipath, son muy pequeñas en comparación con ésta, y como la aportación del ruido a la métrica es muy baja. Cualquier desajuste a causa de multipath entre las pendientes de los picos de correlación quedará reflejado en la métrica.

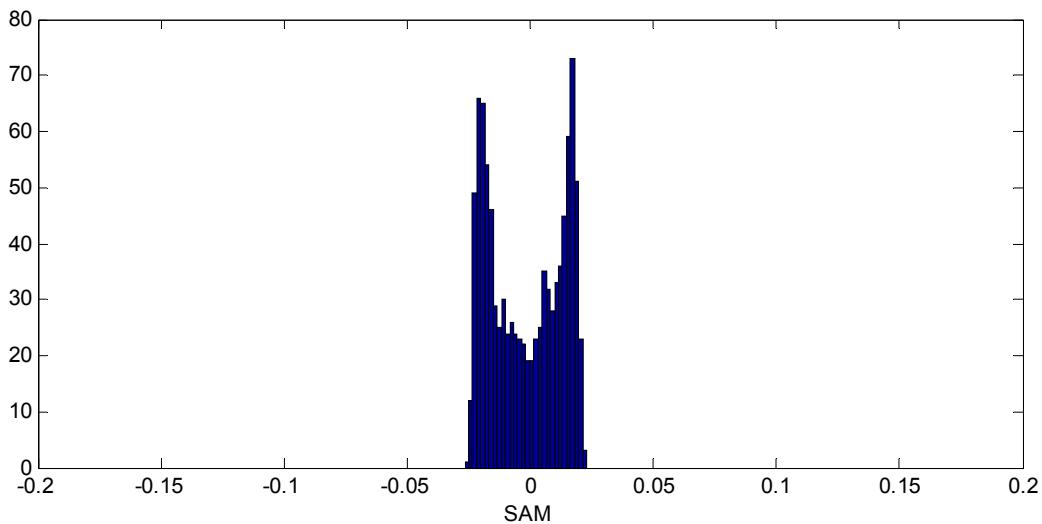


Figura SAT13.2: Histograma de la métrica del satélite 13

A pesar de que la métrica ha conseguido detectar la presencia de multipath, este multipath no afectará de forma notable a los picos de correlación, como se ve en la figura sat13.1, por lo que podríamos afirmar que la señal no se encuentra afectada por multipath.

Satélite 16:

El caso del satélite 16 es parecido al del satélite 13, ambos se encuentran situados en la misma zona respecto al receptor (figura 6.4) y el nivel de CNO medio es parecido en los dos casos.

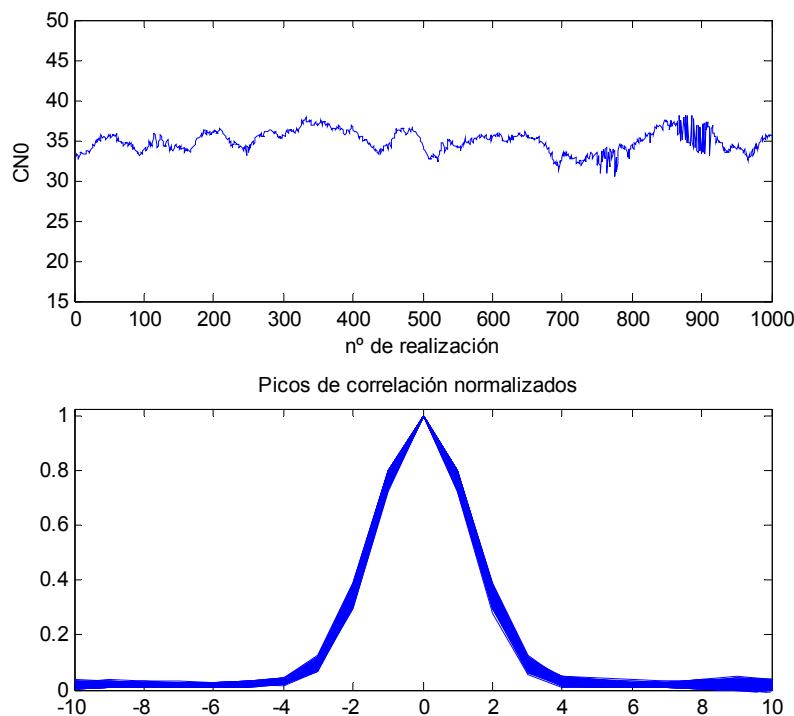


Figura SAT16.1: Nivel de CN0 y picos de correlación del satélite 16

Los picos de correlación de este satélite se encuentran muy definidos y con una gran simetría, que se puede ver en el histograma de la métrica SAM y, además, sigue la misma tendencia comentada en el histograma del satélite 13 (figura sat13.2).

Con estos datos podemos confirmar que el satélite 16 no se encontraba afectado por multipath y que podría haber sido utilizado para realizar el cálculo de posición, sin que se produjesen en ella errores por multipath.

Si nos fijamos en figura 6.4, podemos ver como el satélite 13 y el 16 se encuentran más o menos en la misma zona respecto al lugar en que se situaba el receptor, por lo que teníamos visión directa entre los dos satélites y el receptor.

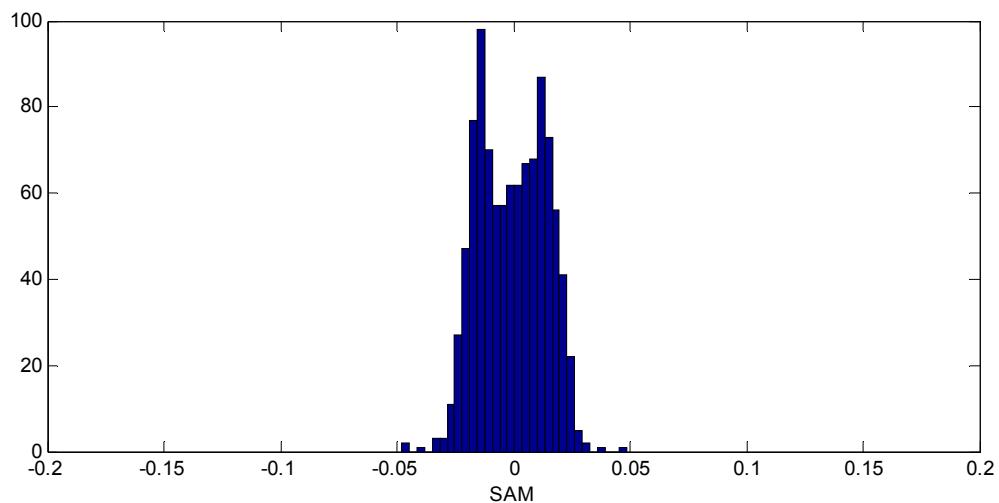


Figura SAT16.2: Histograma de la métrica del satélite 16

Satélite 17:

Como vemos en la figura sat17.1, este satélite tiene un nivel medio de señal (tabla5.1), por lo que si durante el tiempo de observación ha aparecido multipath, podremos detectarlo con facilidad.

Si miramos los picos de correlación de sat17.1, vemos como existe una pequeña asimetría en lateral derecho del pico de correlación con respecto al lateral izquierdo, que se verá al calcular la métrica.

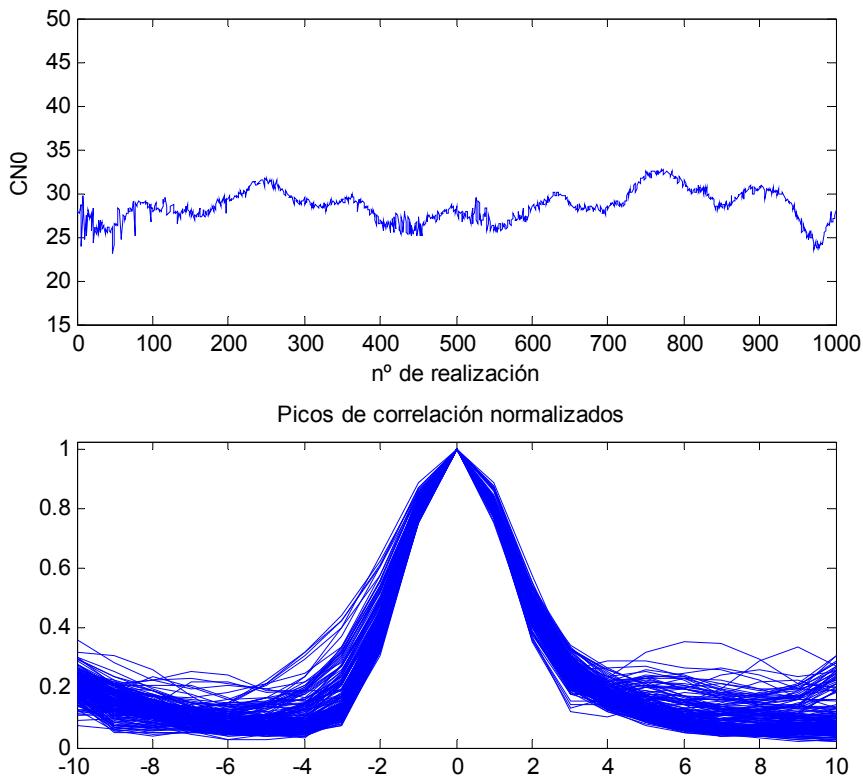


Figura SAT17.1: Nivel de CNO y picos de correlación del satélite 17

El histograma de la métrica muestra algo que no habíamos visto hasta ahora en ningún satélite. Como vemos, la SAM muestra el efecto provocado por dos tipos de multipath distinto, uno claramente situado en torno a 0.05 (multipath₁) y otro alrededor de -0.02 (multipath₂), por lo que no tendría sentido realizar la correlación entre todas la muestras de SAM ya que estaríamos intentando comprobar el relación entre dos tipos diferentes de multipath.

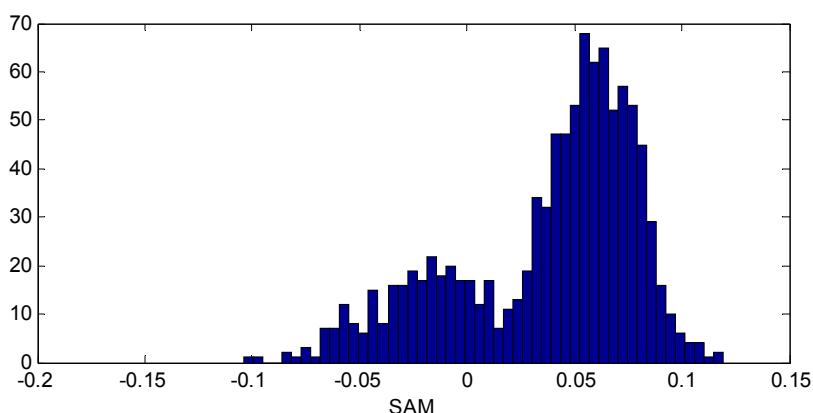


Figura SAT17.2: Histograma de la métrica del satélite 2

A pesar de esto, parece bastante claro que la señal del satélite 17 se encuentra afectada por multipath y, además, se trata de un multipath que puede variar a pesar de que el receptor se mantenga totalmente estático durante todo el tiempo de observación, por lo que puede dificultar su detección.

Satélite 20:

Según podemos ver la figura sat20.1 y si seguimos la clasificación de la tabla 5.1, el satélite 20 tiene un nivel de señal entre medio y bajo, ya que se encuentra en torno a los 28 dBHz. Además, si tenemos en cuenta la situación del satélite (figura 6.4), vemos que éste se encuentra muy alejado del receptor y, además, oculto tras el propio edificio de los laboratorios.

Como hemos dicho, si calculamos la métrica de los picos de correlación del satélite 20 y realizamos el histograma de la figura sat20.2, vemos como ésta tiene un gran dispersión y se encuentra centrada sobre 0. Por lo que nos podría llevar a pensar que la SAM obtenida es producto del ruido.

Pero si nos fijamos en la correlación de las muestras de SAM, podemos observar como no son del todo aleatorias si no que guardan una cierta similitud, que al mirar el histograma no era apreciable debido al alto nivel de ruido.

Por lo tanto, no podemos confirmar con la métrica SAM que este satélite se encuentre afectado por multipath, aunque si realizamos un análisis más profundo podríamos afirmar que la asimetría de los picos de correlación no es sólo producto del ruido.

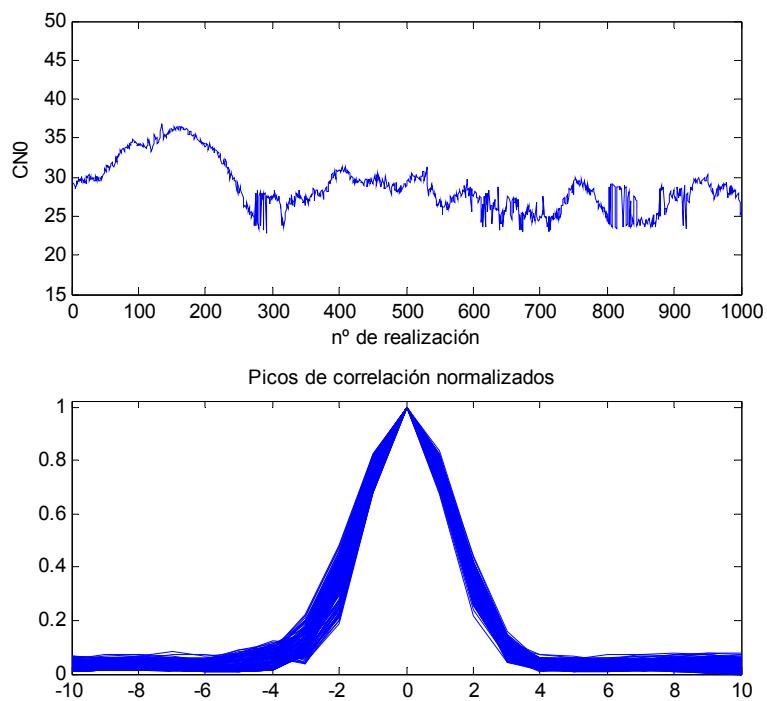


Figura SAT20.1: Nivel de CN0 y picos de correlación del satélite 20

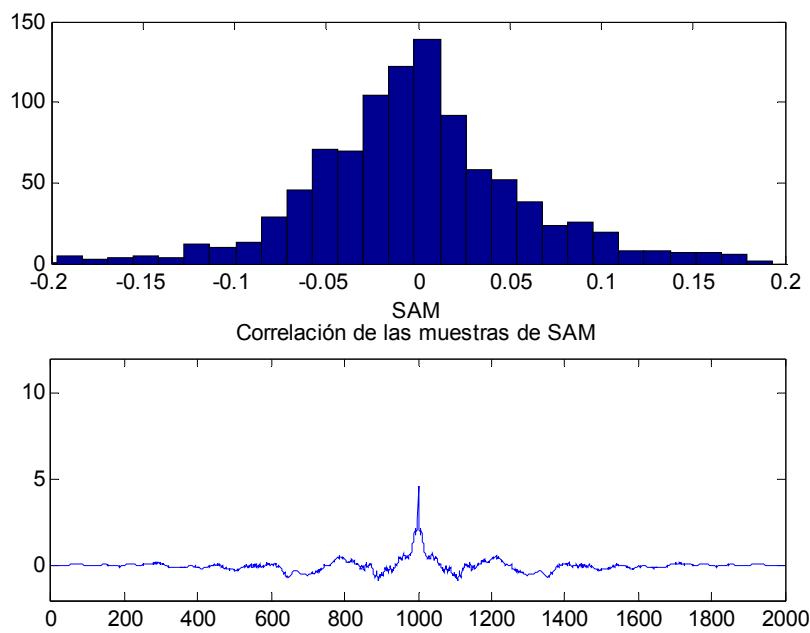


Figura SAT20.2: Histograma de la métrica del satélite 20 y correlación de las muestras de SAM

Satélite 23:

El caso del satélite 23 es bastante parecido al 13 y 16, aunque en esta ocasión, el nivel de la señal toma valores altos en ocasiones y, en otros tramos, llega a tener valores de CNO cercanos a los 25 dBHz. Esto se puede ver en el gráfico de la figura sat23.1, donde se muestra el valor de CNO para cada realización.

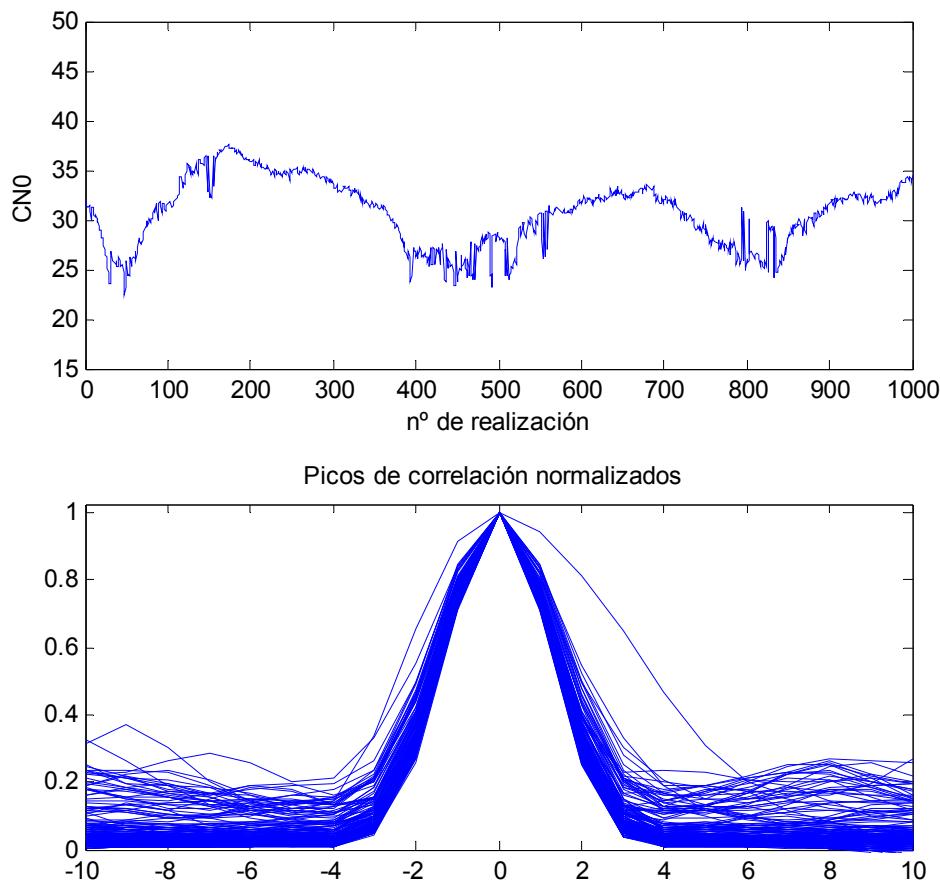


Figura SAT23.1: Nivel de CNO y picos de correlación del satélite 23

El hecho de que en ocasiones el satélite tenga una CNO baja repercute en la forma de algunos de los picos de correlación de la señal recibida, como podemos ver en la parte de debajo de figura sat23.2. Y se observa que la mayoría de las correlaciones corresponde a un nivel de CNO elevado, por lo que están claramente definidos, mientras que existen otros que, a causa del ruido, se ven modificados.

Como consecuencia provoca que, al calcular la métrica de los picos de correlación, obtengamos más dispersión que en el caso de los satélite 13 y 16. Pero si nos fijamos en el

histograma de la SAM del satélite 23 (figura sat23.2), éste sigue la misma tendencia que dichos satélites.

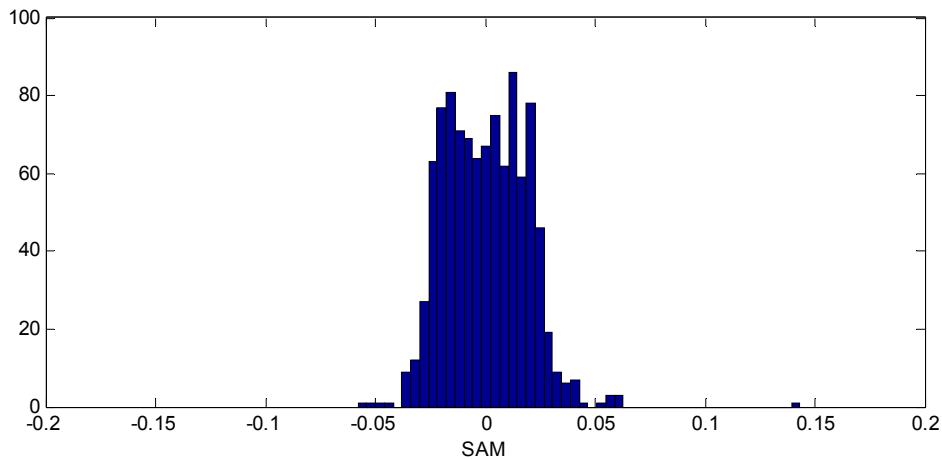


Figura SAT23.2: Histograma de la métrica del satélite 23 y correlación de las muestras de SAM

Satélite 25:

El satélite número 25 tiene una CN0 alta cercana a los 42 dBHz durante casi todo el tiempo de observación, lo cual, como sabemos, podría facilitar la localización de multipath a través de la métrica SAM, en caso de que existiese.

Como podemos ver en la figura sat25.1, los picos de correlación tienen una gran simetría respecto al pico máximo. Al calcular la métrica vemos como, en realidad, existe una pequeña diferencia entre las pendientes (figura sat25.2) similar a la que veíamos en los satélites 13 y 16, que si bien quedaba reflejada al calcular la métrica, esta no afecta a la señal para poder realizar el cálculo de posición.

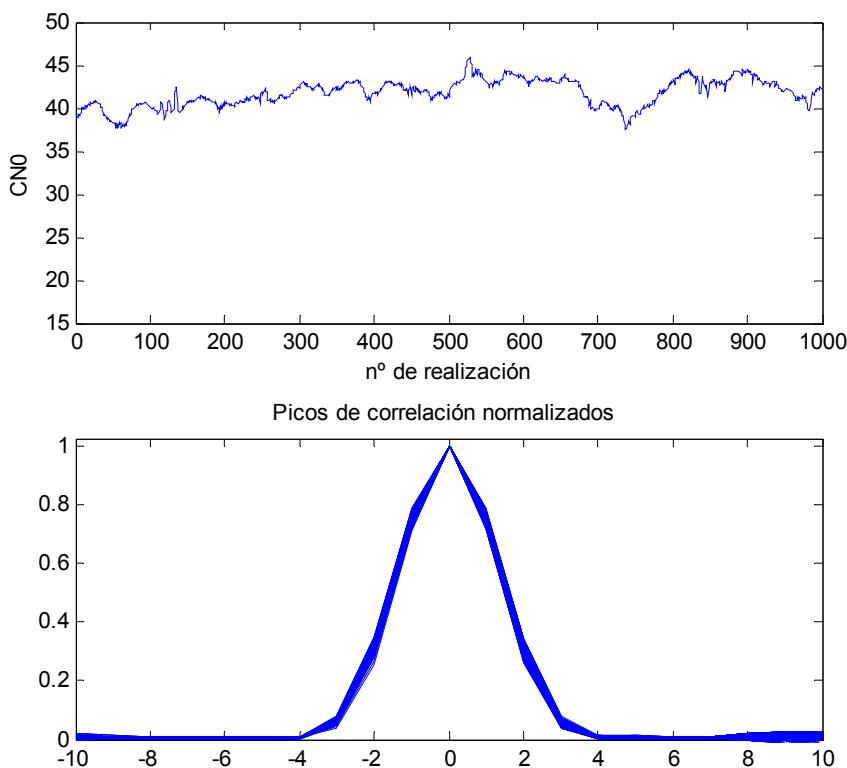


Figura SAT25.1: Nivel de CN0 y picos de correlación del satélite 25

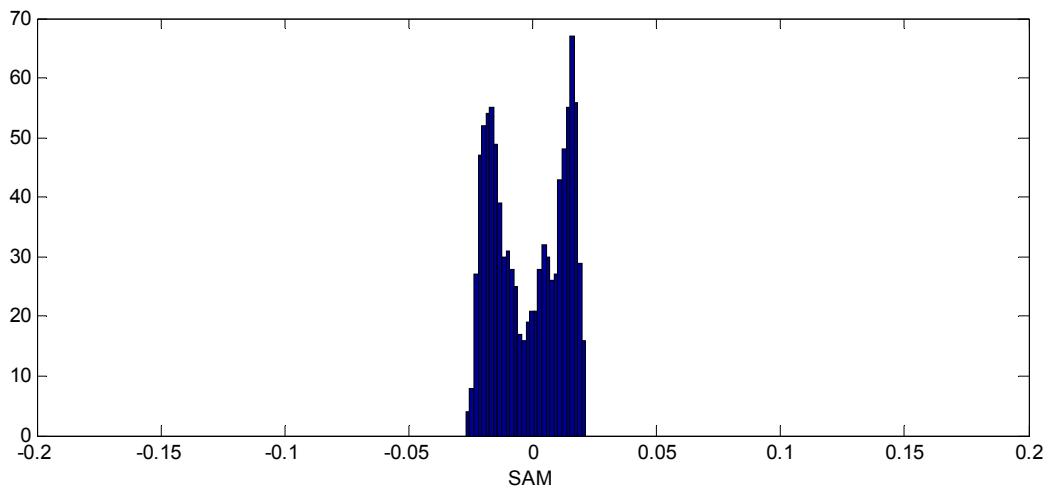


Figura SAT25.2: Histograma de la métrica del satélite 25

Los satélites 13, 16, 23 y 25 se encuentran en la misma zona del espacio (figura 6.4) respecto al receptor y, como hemos visto hasta ahora, no se encuentran afectados por multipath como nos ha indicado la métrica en los 4 casos. El satélite 31 también se encuentra en la misma

zona, pero, como veremos a continuación, es posible que éste se encuentre oculto tras los edificios de la escuela, provocando un multipath mucho más importante que en los casos de los satélites 13, 16 ,13 y 25.

Satélite 31:

Como podemos ver en la figura sat31.1, el satélite 31 tiene una potencia de señal de nivel medio (tabla 5.1), por lo que, según las características de la métrica SAM, es suficiente para que la métrica pueda sernos útil.

Para empezar, si nos fijamos en los picos de correlación de la señal del satélite 31, podemos ver que no tienen ninguna simetría y, además, vemos que podríamos diferenciar entre diferentes tipos de asimetría distinta, como se refleja en la figura sat31.1. Esto es posible que venga provocado por, al menos, dos tipos distintos de multipath.

Para comprobarlo, recurrimos al cálculo de SAM, la que, según vemos en la figura sat31.2, nos informa de que como sospechábamos, se han producido, al menos, dos tipos diferentes de asimetría una centrada en torno a -0.15 y otra (en menor número) en torno a 0.13.

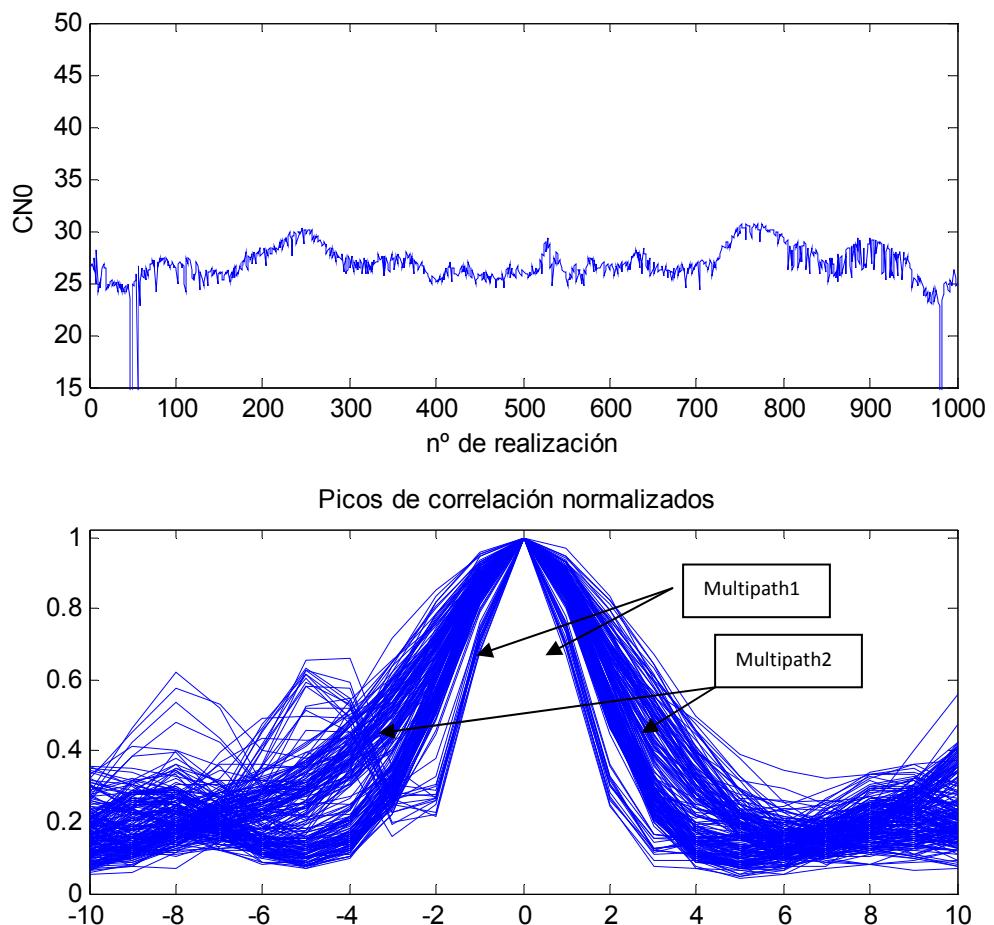


Figura SAT31.1: Nivel de CN0 y picos de correlación del satélite 31

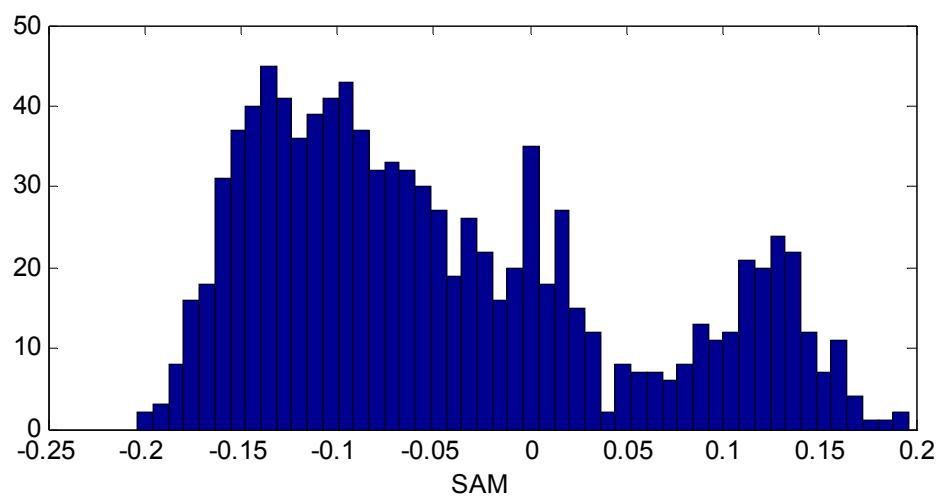


Figura SAT31.2: Histograma de la métrica del satélite 31

Si conocemos los picos de correlación que provocan esos valores de SAM, podemos realizar un promedio de ellos y presentarlos de la siguiente forma:

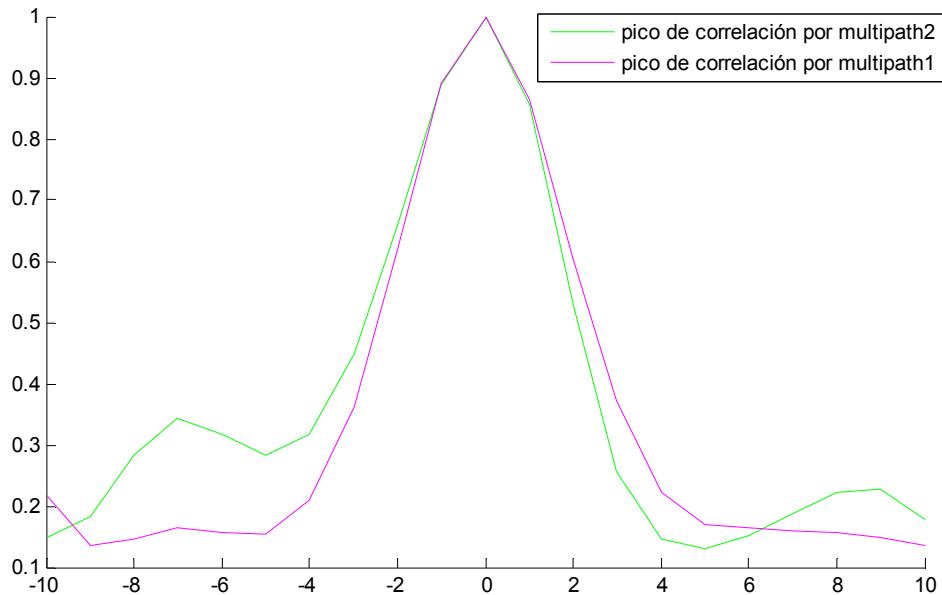


Figura SAT31.3: Pico de correlación promedio consecuencia de los dos tipos de multipath

Como se puede ver en la figura sat31.3, cada multipath provoca una asimetría diferente en los picos de correlación. En el caso de los que hemos llamado multipath1, se produce un aumento en la pendiente izquierda, lo que da como resultado la métrica SAM centrada sobre 0.13. Si nos fijamos en multipath2, se produce el caso contrario, ya que ahora, la pendiente negativa es mayor (en valor absoluto) que la pendiente izquierda. Este hecho provoca que los resultados de la métrica son centrados en -0.15.

Satélite 32:

El satélite número 32 tiene una CNO que durante todo el tiempo de observación ronda los 27dBHz, por lo que, como ha sucedido hasta ahora, si la señal recibida está afectada por multipath, la métrica SAM podrá detectarlo.

En la figura sat32.1, podemos ver la gráfica del nivel de señal para cada realización y en la parte de debajo de la figura, vemos la forma de los distintos picos de correlación del satélite 32.

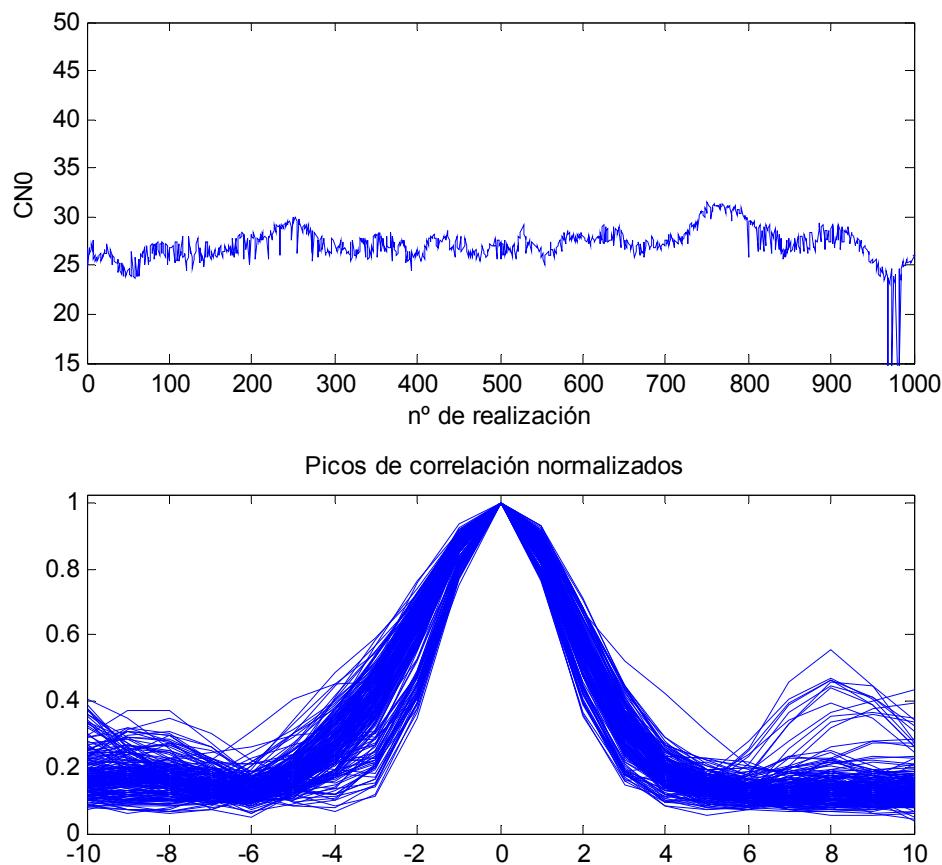


Figura SAT32.1: Nivel de CNO y picos de correlación del satélite 32

Si calculamos la métrica SAM obtenemos el siguiente histograma:

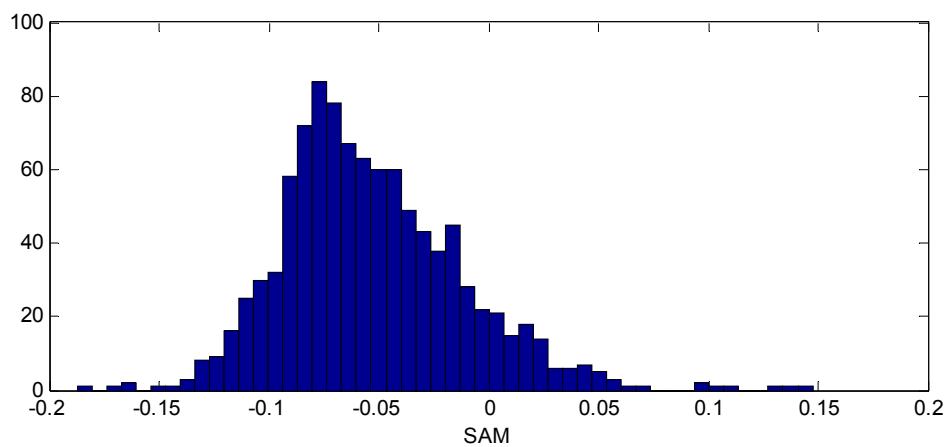


Figura SAT32.2: Histograma de la métrica del satélite 32

El histograma nos muestra como la métrica no está centrada sobre un determinado valor sino que se podría decir que existen dos valores (aproximadamente -0.05 y -0.07), muy cercanos, en los cuales se centran dos tipos diferentes de multipath. El hecho de que los dos valores se encuentren tan juntos, nos impide hacer un análisis más preciso de cada multipath, como hicimos con el satélite 31.

No obstante, parece que la métrica funciona correctamente y hemos sido capaces de detectar la aparición de multipath, a pesar de que éste ha variado ligeramente durante el tiempo de observación.

6.2.2 Conclusiones de las medidas experimentales

Después de haber analizado los datos capturados con la métrica SAM, podemos sacar las siguientes conclusiones:

Existen varios satélites sobre los cuales podemos confirmar la existencia de multipath y otros sobre los que la métrica también nos da información útil para confirmar que no existe multipath sobre esa señal. Y, por último, tendríamos otro grupo de satélites de los cuales la métrica no aporta información suficiente y podría inducirnos a un error si creemos que no existe multipath (ya que las propiedades de la métrica resultante son parecidas a las de un satélite no afectado por multipath.), cuando sí que es posible que exista.

La métrica detecta		La métrica no ofrece indicios suficientes
Multipath	No multipath	
SV4	SV7	SV2
SV11	SV13	SV8
SV17	SV16	SV10
SV31	SV23	SV20
SV32	SV25	

Tabla 6.2: Resultados de la métrica para cada satélite

En la tabla 6.2, se muestra una clasificación de todos los satélites en función del resultado obtenido con la métrica SAM.

Como vemos, la métrica resulta determinante para la mayoría de los satélites (10) y no aporta indicios suficientes para detectar multipath en solamente 4 satélites.

Para futuras investigaciones, sería interesante poder aplicar el cálculo de la métrica para mejorar el cálculo de la posición en un escenario afectado por multipath, escogiendo los satélites utilizados para ello, teniendo en cuenta el resultado de la métrica, ya que, de esta forma, el resultado debería evitar los efectos del multipath.

Por ejemplo, en un escenario en el que podemos escoger entre 5 satélites para el cálculo de posición, si uno de ellos se encuentra afectado por multipath, es mejor no utilizarlo y realizar el cálculo con los 4 restantes, suponiendo que la posición a encontrar se encuentra sobre la superficie de la tierra.

Uno de los problemas que puede aparecer, es que se necesiten demasiados picos de correlación para sacar información útil con la métrica, lo cual se traduce en un tiempo de observación muy grande. Ya que, recordemos que, el tiempo de observación del escenario analizado en este trabajo es de 10 minutos.

Otro tema a estudiar sería el tiempo durante el cual la métrica obtenida es coherente, ya que como ha sucedido durante las medidas experimentales, en ocasiones, aparecían diferentes tipos de multipath durante todo el tiempo de observación, de manera que los resultados no eran fáciles de analizar.

Bibliografía

- [Ded] George Dedes, Andrew G Dempster. Indoor GPS Positioning Challenges and Opportunities
- [Gol05] Goldsmith, Andrea, 1964. Wireless communications / Andrea Goldsmith. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2005.
- [Gün08] Günter Hein, Matteo Paonni, Victoria Kropp, Andreas Teuber. GNSS indoors, Fighting the fading. Part I. Marzo-Abril de 2008.
- [Hay00] Haykin, Simon S. Communication systems / Simon Haykin. New York [etc.] : John Wiley & Sons, cop. 2001 [i.e. 2000]
- [Lop-R05] Gustavo López-Risueño, Gonzalo Seco-Granados. CNO Estimation and Near-Far Mitigation for GNSS Indoor Receivers
- [Lop-S09] José A. López-Salcedo, Juan Manuel Parro-Jiménez, Gonzalo Seco-Granados. Multipath Detection Metrics and Attenuation Analysis Using a GPS Snapshot Receiver in Harsh Environments. Enero 2009
- [Lop-S08] José A. López-Salcedo, Gonzalo Seco-Granados. Experimental Analysis of GPS L1 Signals in Indoor Propagation Environments. 2008
- [Opp98] Oppenheim, Alan V., 1937- Señales y sistemas / Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky. México, D.F. [etc.] : Prentice-Hall Hispanoamericana, cop. 1998.
- [Pas99] Alessandro Pasetti and Luisella Giulicchi. Experimental Results on Three Multipath Compensation Techniques for GPS-based Attitude Determination. Febrero 1999
- [Pro02] Proakis, John G. Communication systems engineering / John G. Proakis, Masoud Salehi. Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall, cop. 2002.
- [Pro01] Proakis, John G. Digital communications / John G. Proakis. Boston [etc.] : McGraw-Hill, cop. 2001 [sic]

- [Sal87] A. A. M Saleh and R. A. Valenzuela. A statistical model for indoor multipath propagation. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 5, pp. 128-137, Feb. 1987.
- [Sal03] Sallent Roig, Oriol. Principios de comunicaciones móviles / Oriol Sallent Roig, José Luis Valenzuela González, Ramón Agustí Comes. Barcelona : Edicions UPC, 2003.
- [Sch] S. Schön and O. Bielenberg. On the capability of high sensitivity GPS for precise indoor positioning.
- [Tsu05] Tsui, James Bao-yen. Fundamentals of global positioning system receivers : a software approach / James Bao-Yen Tsui. Hoboken, New Jersey [etc.] : John Wiley & Sons, cop. 2005. G109.5 .T78 2005.
- [Yun] Yunchun Yang, Ronald R. Hatch, and Richard T. Sharpe. GPS Multipath Mitigation in Measurement Domain and Its Applications for High Accuracy Navigation

Referencias Web

- [1] <http://www.navcen.uscg.gov/gps/modernization/>. USCG Navigation center.
- [2] <http://www.insidegnss.com/node/713>. AGNSS Standardization.
- [3] <http://www.icc.cat/web/content/ca/index.html>. Institut Cartogràfic de Catalunya
- [4] <http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Rinex2.html>. RINEX2
- [5] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=00873856>. Performance Characterization of GPS Receivers under Tree Canopies

Anexo

Simulación con Matlab del cálculo de SAM

(Ver versión física)

Resum:

Aquest projecte es centra en l'anàlisi de senyals GPS, utilitzant un receptor software desenvolupat amb Matlab en un projecte d'investigació per a l'Agència Espacial Europea (ESA), per part del departament de Telecomunicació i Enginyeria de Sistemes de l'ETSE. Aquest software utilitza tècniques de processat de senyal d'alta sensibilitat (HS-GNSS) que permet a l'usuari determinar la seva posició en entorns de difícil propagació com pot ser el cas d'escenaris interiors. Les dades experimentals s'analitzen en funció del nivell de multipath que afecta al senyal de cadascun dels satèl·lits, i la degradació que els escenaris interiors provoquen en els senyals, a causa del mobiliari, parets, persones, etc.

Per a analitzar les dades experimentals, s'ha utilitzat una mètrica presentada en el congrés internacional EuCAP 2009, amb la qual és possible caracteritzar els senyals en funció del nivell de multipath.

Resumen:

Este proyecto se centra en el análisis de señales GPS, utilizando un receptor software desarrollado con Matlab en un proyecto de investigación para la Agencia Espacial Europea (ESA), llevado a cabo por parte del departamento de Telecomunicaciones e Ingeniería de Sistemas de la ETSE. Este software utiliza técnicas de procesado de señal de alta sensibilidad (HS-GNSS) que permite al usuario determinar su posición en entornos de difícil propagación como puede ser el caso de los escenarios interiores.

Los datos experimentales se analizan en función del nivel de multipath que afecta a la señal de cada uno de los satélites, y la degradación que los escenarios interiores provocan en las señales, a causa del mobiliario, paredes, personas, etc.

Para analizar los datos experimentales, se ha utilizado una métrica presentada en el congreso internacional EuCAP 2009, con la que es posible caracterizar las señales en función del nivel de multipath.

Summary:

This project focuses on the analysis of GPS signals, using a Matlab software receiver developed in a research project for the European Space Agency (ESA), by the department of Telecomunicaciones e Ingeniería de Sistemas. This software uses signal processing techniques of high sensitivity (HS-GNSS) which allows the user to determine his position in harsh environments such as indoor scenarios. Experimental data are analyzed according to the level of multipath which affects the signal from each of the GPS satellites and the degradation caused in signals, because of the furniture, walls, people, etc.. typical of indoor scenarios.

To analyze the experimental data, a metric capable to characterize the signals according its level of multipath, is used. This metric was presented in the international congress EuCAP 2009.

