

Campaña de estudio sobre el centelleo ionosférico y su impacto en las comunicaciones espaciales

Inés RUIZ GÓMEZ¹, José Ángel RUIZ DEL ARBOL¹, Benito DE LA MORENA²,
Fernando MACIÁ¹

¹ Ingeniería y Servicios Aeroespaciales (INSA), Spain
(iruiiz@insa.org, jaruiz@insa.org, fernando.macia@insa.org)

² Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Spain
(morenacb@inta.es)

(Recibido, 9 julio 2008; recibido en forma revisada, 28 julio 2008; aceptado, 29 julio 2008)

RESUMEN:

Este trabajo muestra las relaciones establecidas entre el centelleo ionosférico y las comunicaciones espaciales tras un estudio realizado en los años 2003 y 2004 en las regiones subtropicales. Este estudio se llevó a cabo tras la constatación de pérdidas de información entre varios satélites y el segmento de tierra en los mismos periodos de tiempo. El Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial lanzó una campaña para la que se creó un software especial para analizar exclusivamente la influencia de este fenómeno en la señal recibida.

Palabras Clave: Enlace de bajada, Enlace de subida, AGC (Control Automático de Ganancia); Fluctuación, Segmento de tierra, TEC (Contenido Total de Electrones), Centelleo, Tormenta Geomagnética.

ABSTRACT:

This paper shows the relationship between ionospheric scintillation and spatial communications detected after a study carried out during years 2003 and 2004 in subtropical regions. This study was made after realizing that there were some lost packages in communications between satellites and ground segments located in these regions at the same time. The Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial decided to carry out a campaign in order to study this phenomenon.

Keywords: Downlink, Uplink, AGC, Fluctuation, Ground Segment, TEC (Total Electron Content), Scintillation, Geomagnetic Storm.

1. INTRODUCCIÓN

En los años 2001 y 2002 se constataron unas fluctuaciones en la señal de las transmisiones entre algunos satélites y el segmento de tierra que las recibía. Estos segmentos de tierra se sitúan en distintas regiones del planeta que se localizan en zonas de latitud entre los 20° y los 27° Norte.

Estas fluctuaciones se presentaban en forma de ruido que alteraba la señal cada vez más atenuada. Como consecuencia de estas fluctuaciones se perdían algunos

paquetes de información, es decir, no toda la información que enviaban los satélites era recibida. Estas pérdidas se daban siempre en unos periodos concretos del año, los equinoccios, así como en unas horas más o menos fijas del día, el atardecer, empezando las fluctuaciones a las 19h (hora local) y durando, como máximo, hasta las 02h (hora local).

Las comunicaciones que experimentaban estas fluctuaciones empleaban distintas frecuencias, preferentemente en bandas L, S y X. Comprobando que este hecho se producía con periodicidad, se decidió lanzar una campaña de pruebas para el estudio de estas fluctuaciones del Control Automático de Ganancia (AGC) en estas regiones y en estas frecuencias. Como su nombre indica, el AGC es un control empleado para ajustar automáticamente el nivel de la señal de entrada para dar un valor determinado a la señal de salida y mantener así la señal constante. Cuando el AGC fluctúa, se debe a que la señal de entrada cambia y, por tanto, tiene que variar también para dar una señal de salida constante. En el proceso adoptado, se intentaba aislar el problema para identificarlo correctamente.

Tras estudiar y analizar diferentes posibles causas de estas fluctuaciones, se consideró el centelleo como la más probable puesto que este fenómeno tiene una gran intensidad en las regiones entre los $\pm 20^\circ$ de latitud si bien las comunicaciones analizadas se producían en estaciones un poco más al norte de esta latitud.

La campaña comenzó a gestarse en verano del 2003 con idea de lanzarla para el equinoccio de otoño de ese mismo año, visto que esta época del año se había revelado como momento crítico.

Se procedió al diseño de una aplicación específica que se fue modificando durante la campaña, tras las primeras observaciones, para refinar los resultados obtenidos. Este software analizaría el downlink (enlace de bajada de los datos desde el satélite hasta el segmento de tierra) y sus variaciones con la ayuda de una serie de equipos localizados en las propias estaciones de recepción.

Los datos registrados ayudaron a identificar centelleo ionosférico y tormentas geomagnéticas, fenómeno común en el mes de Noviembre durante los últimos años.

Las fluctuaciones se registraron y estudiaron durante 2003 y hasta mayo de 2004, retomándose las medidas en septiembre de 2004 para completar el estudio con los datos de los siguientes periodos equinocciales. Tras el análisis de los datos y los gráficos obtenidos, se compararon los resultados para las señales de distintas frecuencias.

2. DATOS SOBRE LA IONOSFERA

Debido a la radiación solar, la ionosfera de la Tierra está integrada por varias regiones de ionización. A todos los efectos prácticos en materia de comunicaciones, se ha observado que las regiones de la ionosfera contribuyen decisivamente al Contenido Total de Electrones (TEC) entre el satélite y los terminales de tierra (Anderson y Fuller-Rowell, 1999).

En cada región, el medio ionizado no es homogéneo en el espacio ni constante en el tiempo. Desde un punto de vista general, la ionización de fondo experimenta variaciones relativamente regulares, tanto diurnas como estacionales o debidas al ciclo

solar de 11 años, y depende en gran medida de cuál sea la localidad geográfica que se considere y la actividad geomagnética. Aparte de la ionización de fondo, siempre se manifiestan estructuras no estacionarias de pequeña escala y altamente dinámicas, que se conocen con el nombre de irregularidades. Tanto la ionización de fondo como las irregularidades degradan las ondas radioeléctricas y hacen que el índice de refracción sea dependiente de la frecuencia, es decir, que el medio sea dispersivo.

3. DEGRADACIÓN PRINCIPAL DEBIDO A IRREGULARIDADES: CENTELLEO

Una de las perturbaciones más agudas que se registran a lo largo de un trayecto de propagación transionosférica para señales por debajo de 3 GHz (bandas L y S) es la provocada por el centelleo ionosférico. Pequeñas estructuras irregulares en la densidad de ionización ocasionan, -principalmente a través de mecanismos de centelleo y difracción hacia delante-, fenómenos de dispersión en los que la señal estacionaria del receptor es sustituida por una señal que fluctúa en amplitud, fase, y dirección aparente de llegada. Dependiendo de la modulación del sistema, su calidad de funcionamiento se ve afectada de manera diferente por diversos aspectos del centelleo.

En la región ecuatorial y en los periodos del máximo del ciclo solar, la amplitud de atenuación para 1.5 GHz puede sobrepasar los 20 dB durante varias horas en el ocaso, momento en el que la ionosfera se vuelve más turbulenta.

Hay dos zonas geográficas de intenso centelleo (Reinisch, 1996), una a elevadas latitudes y otra centrada entre $\pm 20^\circ$ con respecto al ecuador magnético. En las latitudes medias el centelleo afecta básicamente a las señales en ondas métricas.

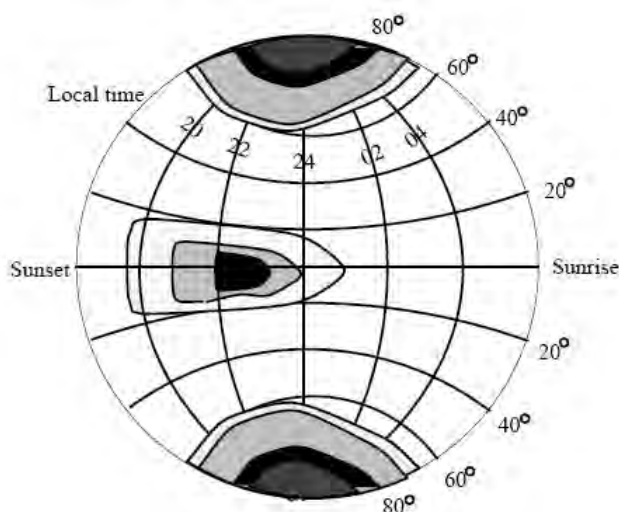
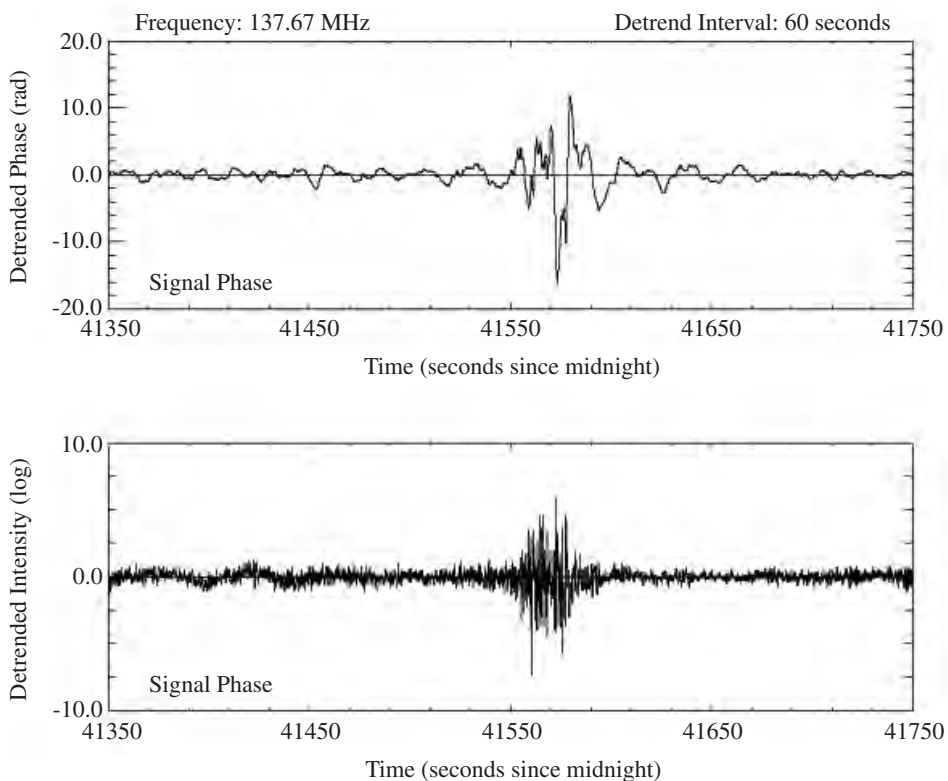


Figura 1.- Efecto del centelleo durante periodo de moderada actividad solar. Las zonas más oscuras son aquellas en las que el centelleo tiene mayor intensidad (Anderson y Fuller-Rowell, 1999).

Wideband Pass PF-13-02



Copyright 1998 Northwest Research Associates, Inc.

Figura 2.- Efecto del Centelleo en frecuencia VHF Esta figura muestra un segmento de 400 segundos del efecto del centelleo ionosférico en VHF. La figura superior muestra la fase registrada mientras que la inferior muestra la intensidad registrada. (Nwra, Inc., 1998).

En todos los sectores hay un máximo nocturno de actividad acentuado, como puede verse en la Fig. 1. Para el centelleo ecuatorial, se ha observado que la actividad máxima tiene lugar en el equinoccio de primavera y que también se registra una elevada actividad en el equinoccio de otoño.

En cuanto a las características temporales, cabe señalar que la tasa de desvanecimiento del centelleo ionosférico es de aproximadamente 0,1 a 1 Hz. Un suceso típico de centelleo tiene su inicio después del atardecer ionosférico local y puede durar de 30 minutos a varias horas.

El porcentaje de fluctuaciones de estas irregularidades suele ser muy bajo, incrementándose según se aproxima al ecuador. Hasta ahora, se han realizado importantes estudios sobre la influencia en las bandas L e inferiores (Erwin, 2000; Smith, 1998). La Fig. 2 muestra un ejemplo de estos análisis.

4. DESARROLLO ESPECÍFICO DE UNA APLICACIÓN PARA LA CAMPAÑA

Dentro de las comunicaciones por satélite, la información transmitida tanto del satélite al segmento de tierra como a la inversa se puede realizar en distintas longitudes de onda. La decisión del empleo de una frecuencia u otra depende principalmente del tipo de datos (imágenes, voz, etc.), de la velocidad de transmisión y de los obstáculos que se hayan de salvar. Las frecuencias más elevadas permiten enviar más información por segundo pero las ondas pueden ser detenidas por objetos como las hojas o las gotas de lluvia, lo que se conoce como “rain fade”. Las frecuencias más empleadas en comunicaciones por satélite son:

- Banda L: 1,5 – 2,5 GHz
- Banda S: 2 – 4 GHz
- Banda X: 8 – 12 GHz
- Banda Ku: 12 – 20 GHz
- Banda Ka: 20 – 40 GHz

El impacto del centelleo ha sido señalado en diversas ocasiones en comunicaciones por satélite, sobre todo en sistemas de navegación y otras comunicaciones en frecuencias como VHF o banda L (Wiens, 2003; Fedrizzi, 2001; Fu *et al.*, 1999). Las campañas llevadas a cabo por INSA e INTA se realizaron en comunicaciones principalmente en bandas S y X en las que, entre otros, transmiten actualmente la mayoría de los satélites de observación de la tierra. Para frecuencias mayores (Ku y Ka), el efecto del centelleo es muchísimo menor.

Para la primera campaña se diseñó un prototipo inicial de monitoreo cuya aplicación analizaba las anomalías de radiofrecuencia detectadas durante ciertos periodos de tiempo a lo largo del año, particularmente durante los equinoccios. Los equipos necesarios para realizar estas mediciones se instalaron en el shelter de la antena receptora siguiendo el esquema representado en la Fig. 3

Los equipos son:

- Sensor de Potencia (PS)
- Medidor de Potencia (PM)
- Analizador de Espectros (SA)
- Generador de Señal (SG)
- Acoplador Direccional
- PC con software ad-hoc e interfaz GPIB.

Usando esta configuración del hardware se diseñó un software ad-hoc que funciona en dos procesos diferentes:

1. Recogida de muestras. Este proceso realiza un muestreo periódico, leyendo directamente la señal recibida. En un principio, este muestreo se llevó a cabo cada 30 segundos pero tras la mejora del software (el 29 de Octubre del 2003), se realizó cada 2 segundos por las tardes y noches (entre las 5 pm y las 5 am,

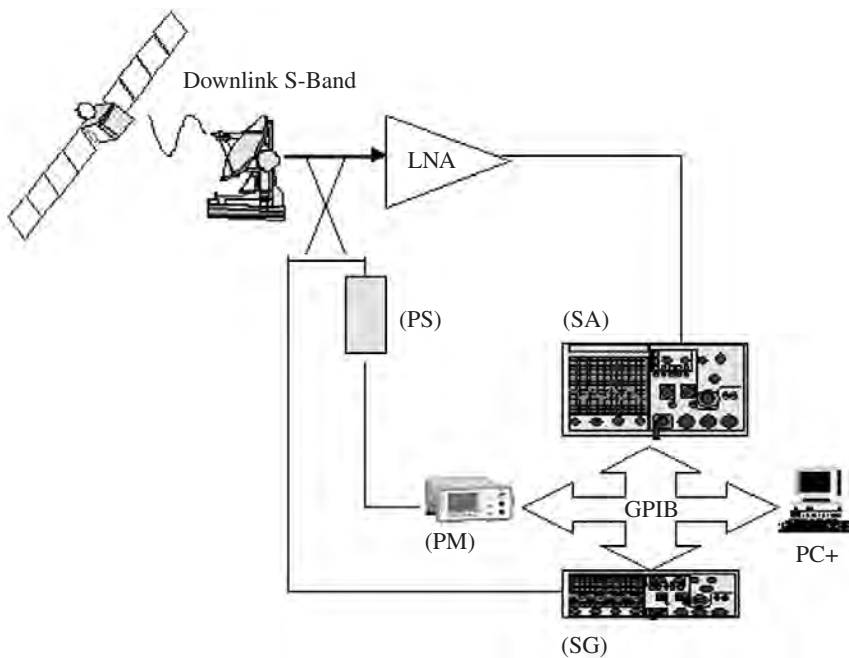


Figura 3.- Diseño del hardware a instalar.

hora local) y cada minuto durante el resto del día, ya que las fluctuaciones parecían surgir preferentemente a partir del ocaso. Los datos almacenados se corrigen con un factor de calibración.

2. Sistema de Calibración. En este proceso se realizan las siguientes acciones

- La señal del satélite se muestra en el analizador de espectro.
- Empleando un generador de señal, se introduce una señal muy próxima en frecuencia a través del acoplador direccional en la entrada del LNA (amplificador de bajo ruido que amplifica la señal recibida del satélite). Los parámetros del analizador de espectros permiten mostrar a la vez ambas señales.
- La amplitud de la señal introducida se cambia automáticamente al nivel de la señal de satélite recibida. Para conseguir esto, el software lee el analizador de espectros y da las instrucciones al generador de señal.
- Una vez que la señal está nivelada, el medidor de potencia lee y almacena la potencia medida por el sensor de potencia.
- En un proceso off-line, empleando los datos de calibración del acoplador, se estima la densidad de flujo de potencia de la señal recibida del satélite.
- El proceso de calibración se hace cada 6 horas para corregir las muestras individuales.

Esta aplicación permite cambiar el intervalo de tiempo de muestreo variando entre día y noche, tomando muestras con más frecuencia si se quiere observar alguna oscilación mayor o menor, etc. Así mismo permite establecer un mínimo para los dB a tener en cuenta ya que el centelleo se ha presentado con variaciones entre 3 y 20dB, por lo que se puede seleccionar un rango de valores que incluya el valor medio de la señal más/menos los dB que se deseen considerar; por ejemplo 30 dB por encima y por debajo de la señal media.

Este sistema se diseñó de manera que el hardware no interfiriese en las comunicaciones de los satélites a estudiar, es decir adquiere datos directos de la señal sin perturbar los que reciben los equipos propios de cada antena.

5. CAMPAÑA DE PRUEBAS

Durante muchos años se han llevado a cabo estudios sobre la influencia del centelleo en las transmisiones en distintas frecuencias, principalmente para comprender los problemas de los receptores GPS, donde el centelleo generaba mucho ruido dando lugar a importantes fallos de posicionamiento (Birsa *et al.*, 2002). En cambio, la influencia del fenómeno en la banda S y en la banda X no estaba casi documentada ni estudiada. Este hecho es el que nos llevó a recopilar información y caracterizar el comportamiento respecto a las comunicaciones en estas frecuencias.

Una vez que a finales del 2002, se tuvo conocimiento de la fluctuación de distintas comunicaciones en estas frecuencias, INTA e INSA comenzaron a diseñar el sistema de toma de datos ya descrito. La aplicación estuvo instalada en las distintas antenas y lista para comenzar a trabajar el 1 de Octubre del 2003, iniciándose entonces la primera campaña de estudio. Con esta primera campaña se quiso caracterizar el problema de las fluctuaciones de la AGC así cómo y por qué se había producido.

Una vez que toda la información y documentación fue recopilada y estudiada, INTA e INSA comenzaron a buscar la causa y las posibles soluciones al fenómeno producido.

Teniendo en cuenta los modelos y teorías que se han establecido sobre el centelleo, se ha comprobado que el punto de incidencia de la señal en la ionosfera en esta latitud coincide con una zona de grandes perturbaciones durante los periodos de centelleo más intensos.

La Fig. 4 muestra la situación y localización del punto de penetración en la ionosfera (mostrado como un punto negro) de la señal de uno de los satélites estudiados durante el 6 de octubre de 2002 (año de máximo solar) a las 22:00 y a las 24:00, hora local, momento éste en que la incidencia era algo menor (ESOC, 2002).

Aunque se sabe que fuera de los periodos equinocciales los efectos del centelleo no son tan frecuentes, se ha seguido tomando datos durante el resto del año para evitar equivocarse en las conclusiones u omitir información.

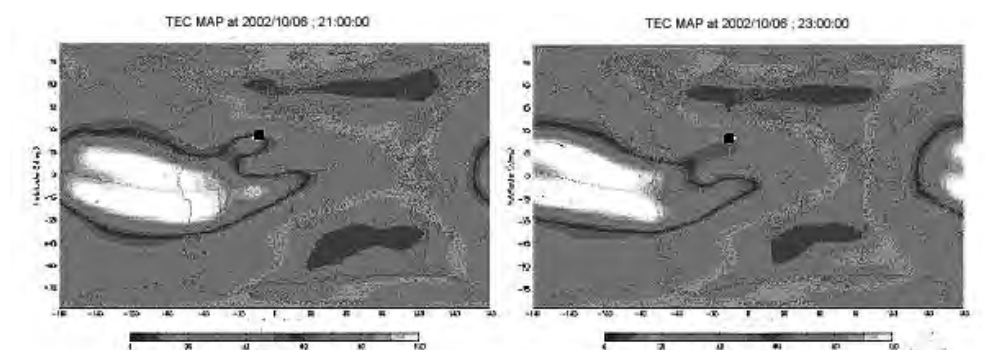


Figura 4.- Punto de penetración en la ionosfera de la señal de uno de los satélites empleados en el estudio según los mapas de TEC.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

ANÁLISIS DE DATOS

Tras tomar las primeras muestras y observar las oscilaciones medias registradas, se tuvo en cuenta que muestreando a 1 minuto se podían perder datos. Por ello se pasó a muestrear cada 2 segundos en las horas consideradas como susceptibles de fluctuaciones. Un ejemplo de las gráficas obtenidas por el sistema de medición durante un día sin fluctuaciones (tomando datos cada 2 segundos) puede verse en la Fig. 5:

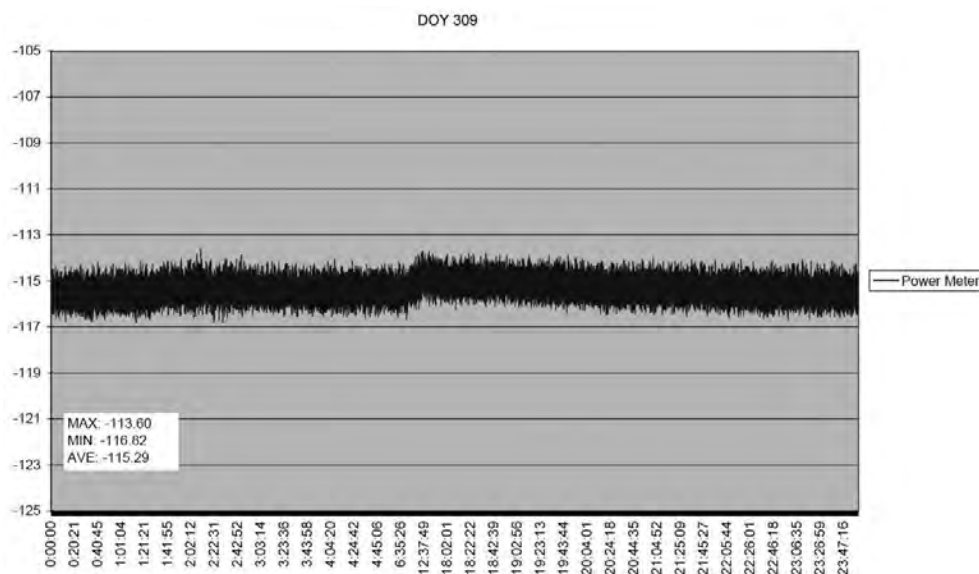


Figura 5.- Datos obtenidos por el sistema de medidas durante un día normal sin fluctuaciones.

Por efecto del centelleo la señal se atenúa más de lo habitual llegando a veces a perderse en el ruido, convirtiéndose en una señal totalmente degradada. Estas irregularidades se dan tanto en el downlink como en el uplink. Los días que se producía centelleo y que éste era suficientemente fuerte para afectar a las comunicaciones, no se apreció sólo atenuación de la señal sino que, en algunos casos, se registraron también pequeñas ganancias, aunque de menor valor que las anteriores.

Durante la primera campaña, desde Octubre 2003 hasta Junio 2004, el fenómeno del centelleo se produjo tan sólo un 18 % de los días de los meses del equinoccio de otoño, mientras que los datos reportados por estos satélites para el año anterior, indicaban una frecuencia del suceso bastante más alta. De estos días de fluctuaciones, sólo 5 de ellos registraron pérdidas de paquetes de trabajo. Afortunadamente, aunque estas fluctuaciones fueron importantes, no resultaron en ningún momento suficientemente intensas como para considerar malas las comunicaciones sino que estuvieron todos los meses, en todos los casos, por debajo de los límites de no disponibilidad establecidos.

En las figuras 6, 7, 8 y 9, se comparan dos días en los que se observaron perturbaciones ionosféricas en el downlink (en los datos analizados) y el resultado de los datos reportados por el uplink.

Como se puede observar, las horas en las que se producen los picos de las fluctuaciones, coinciden. Comparando estas señales, se ha podido ver que es más fácil identificar generalmente el fenómeno en el uplink pues se da con mayor intensidad en la subida que en la bajada. Aunque estos días muestren una variación mayor del uplink que del downlink, en el downlink (banda S) sí hubo pérdida de datos mientras que en el uplink (banda X) no la hubo.

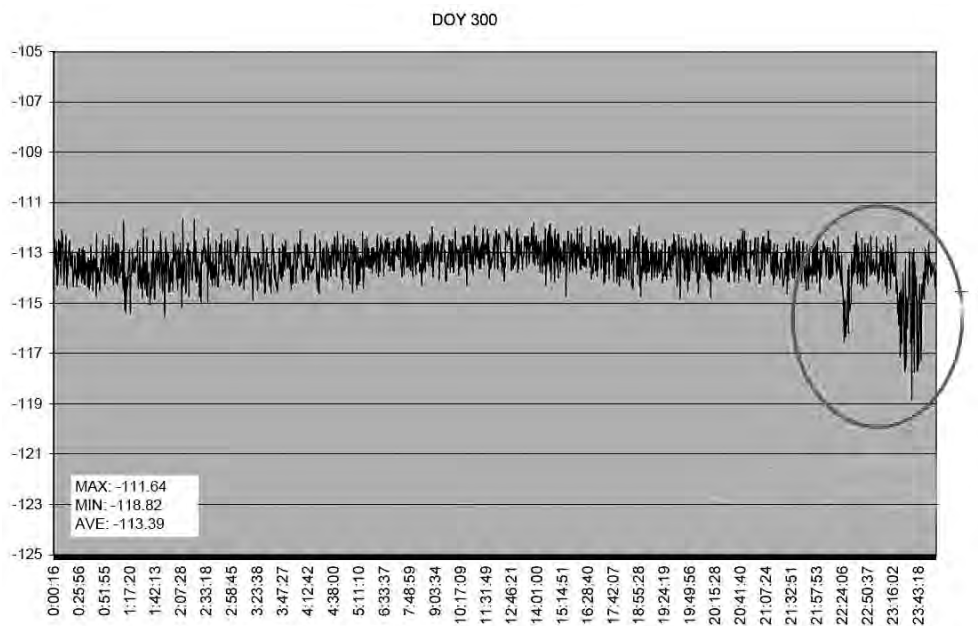


Figura 6.- Downlink: Día 300 del año 2003, con pérdidas de datos por causa del centelleo ionosférico.

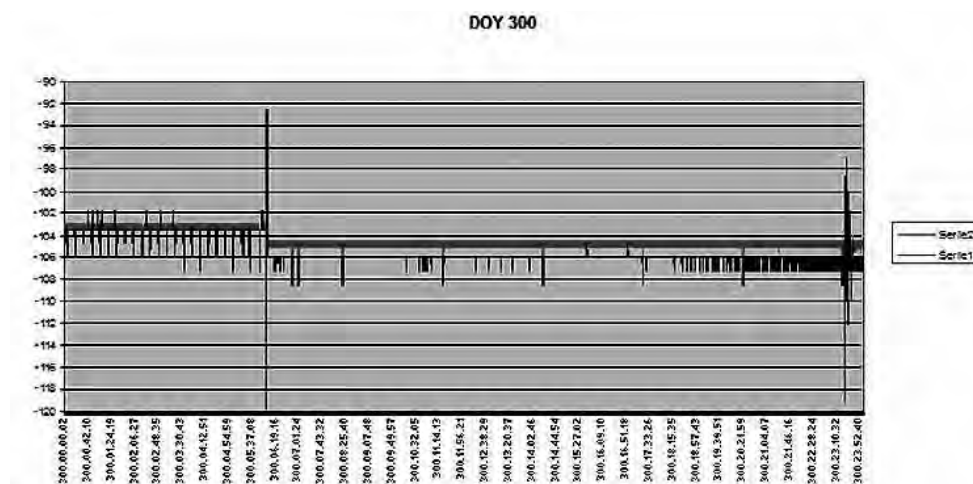


Figura 7.- Uplink: Día 300 de año 2003 con perturbaciones en la señal por el centelleo ionosférico.

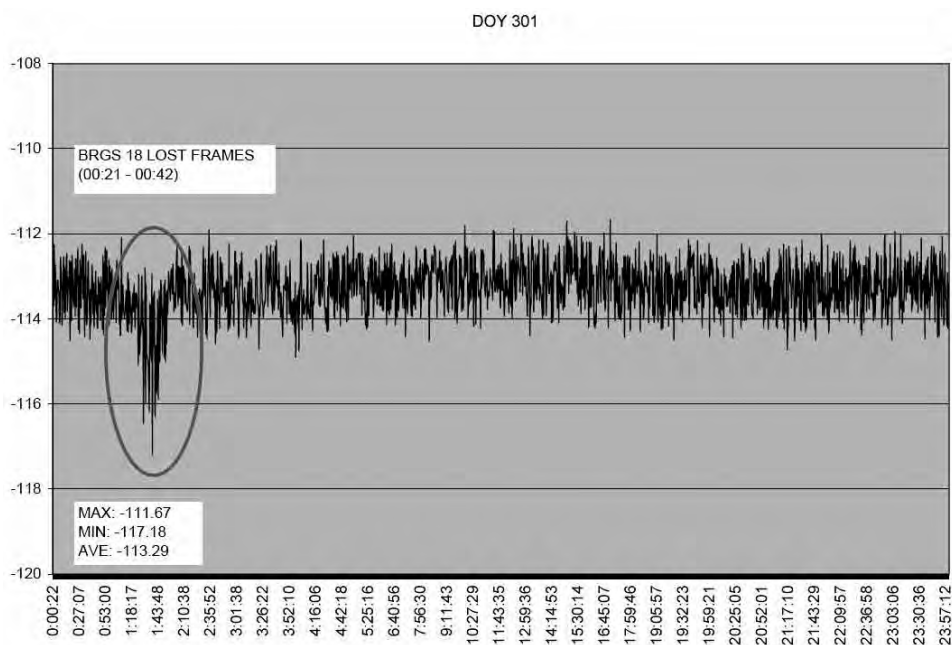


Figura 8.- Downlink: Día 301 del año 2003 con pérdidas de datos (18 paquetes se perdieron entre las 00:21 y las 00:42, hora local) por causa del centelleo ionosférico.

El fenómeno del centelleo se ha presentado casi exclusivamente entre las 21h y las 24h hora local, aunque en los peores días podía provocar cambios en la señal hasta las 3h.

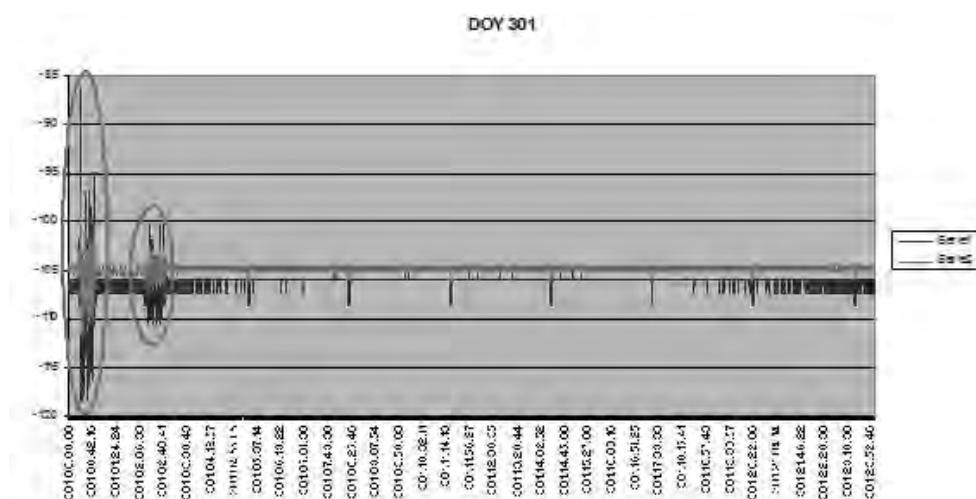


Figura 9.- Uplink: Día 301 del año 2003, con perturbaciones en la señal por el centelleo ionosférico.

Observando que las señales que varían en los días de centelleo ionosférico son las de banda ancha (bandas L, S y X principalmente), y que a menor frecuencia, mayor perturbación y mayor pérdida de paquetes de datos, se confirma el hecho de que el efecto de la ionosfera sobre las ondas de radio es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de transmisión. Se ha comprobado que la banda X se ve mucho menos afectada que las otras y que no pierde datos en sus fluctuaciones mientras que las otras bandas analizadas sí que lo hacen. Sin embargo, no se puede dejar de usar las bandas L y S en las regiones subtropicales y ecuatoriales pues en ellas la precipitación pluvial alcanza una gran intensidad, lo que constituye uno de los principales problemas para las comunicaciones en frecuencias más altas.

Otro importante fenómeno que se ha visto reflejado durante el estudio es el de las *tormentas geomagnéticas*. Aunque el máximo solar del ciclo 23 tuvo lugar en el 2001, durante los últimos días de octubre y los primeros de noviembre del 2003 se produjeron tres explosiones solares de gran magnitud, de las mayores producidas en los últimos 30 años.

Los efectos de las tormentas geomagnéticas se diferencian de los del centelleo principalmente porque afectan a todos los sistemas de comunicaciones, no sólo a la las bandas L, S y X, que son las que veníamos estudiando hasta ahora porque eran las únicas que habían mostrado variaciones. Además afectan a toda la superficie terrestre y a la atmósfera, no sólo a las regiones ecuatoriales y polares, llegando sus efectos a la Tierra dos o tres días después de producirse.

Las fluctuaciones que se generan por las tormentas no se producen a una hora preferente, sino a cualquier hora del día, aumentando su efecto al atardecer en combinación con el alto contenido de electrones de la ionosfera. Estas fluctuaciones en la señal (Fig. 10), a diferencia del centelleo, no son sólo atenuaciones sino que tienen ganancias de igual tamaño. Las variaciones son mayores y en la banda S pueden alcanzar los 15 dB.

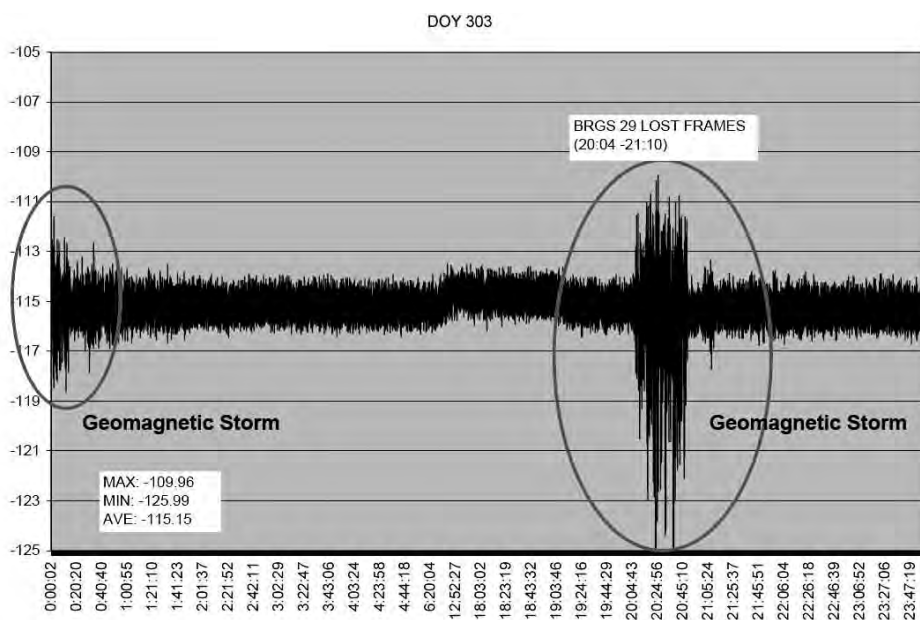


Figura 10.- Influencia de una tormenta geomagnética en la señal de downlink en banda S.

Un resumen del resultado de los datos de esta primera campaña, una vez analizados, se refleja en la Figura 11.

Además de la comunicación satélite – segmento de tierra, se analizó el efecto que se producía en GPS y otros sistemas de navegación en el rango de frecuencia entre 1.2 y 1.7 GHz, en los días que se observaba perturbación. En estos casos, el centelleo provocaba grandes errores de medida y degradación del servicio para los usuarios de estas regiones (medido hasta los 30° Norte).

COMPARACIÓN CON DATOS PREVIOS

Para las pérdidas de las comunicaciones detectadas a lo largo del otoño 2001 y del año 2002 no se contaba con datos de la fluctuación del AGC ya que no se llevaba a cabo ningún tipo de registro de medidas. Sin embargo, sí se tenía un informe de los paquetes de datos perdidos (con sus horas de pérdidas) por una de las comunicaciones en el año 2002. La banda correspondiente era la S, por ello es la que más se ha empleado en estas campañas.

Tanto si se da por hecho que se deben al centelleo como si se achacan a las tormentas geomagnéticas, se podría afirmar, sin lugar a dudas, que en los años 2003 y 2004 el centelleo tuvo mucha menos importancia. Teniendo en cuenta estos resultados y la actividad solar, se puede concluir que, efectivamente, nos habíamos estado dirigiendo hacia el siguiente mínimo del ciclo solar.

OCTOBER 2003

		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

NOVEMBER 2003

					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

DECEMBER 2003

1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

JANUARY 2004

			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

MARCH 2004

1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

APRIL 2004

			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30		




	Fluctuación de la señal por centelleo
	Fluctuación de la señal por centelleo con pérdida de paquetes
	Fluctuación de la señal por tormenta geomagnética con pérdida de paquetes

Figura 11.- Resumen de los días que registraron fluctuaciones en las señales de los distintos satélites durante la campaña de Octubre 2003 a Junio 2004.

7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El centelleo se ha detectado en medidas tomadas directamente de la señal en el enlace de bajada (downlink) de varias comunicaciones en distintas frecuencias en una región entre los 23°N y los 27°N. Se han registrado unas importantes variaciones de señal, siendo más significativas las atenuaciones que las ganancias. Estas perturbaciones de la señal tienen lugar principalmente entre las 21h y las 24h, hora local.

Aunque el fenómeno es perceptible varios días en torno a los equinoccios, estas variaciones no suelen provocar pérdida de datos en la mayoría de los casos. Para cada frecuencia tiene que darse una atenuación mínima (por ejemplo de 6 dB en banda S) para que se observen pérdidas.

La influencia de la ionosfera anómala también se ha reportado en el uplink, aunque ninguno de los satélites informó sobre pérdidas de datos en el uplink.

Se ha comprobado que el efecto de la ionosfera en las ondas de radio es inversamente proporcional al cuadrado de su frecuencia. Esto implica que las frecuencias de la banda X y superiores se ven mucho menos afectadas por el fenómeno del centelleo. Por ello se recomienda el empleo de frecuencias más altas que la banda S para comunicaciones en bajas latitudes.

Tras la primera campaña y observando la evolución del ciclo solar 23 cuyo mínimo se preveía para finales del 2007, se esperaba que los efectos del centelleo sobre las distintas comunicaciones fuesen menguando, hipótesis que quedó demostrada con las siguientes campañas.

8. REFERENCIAS

- BIRSA, R., E. A. ESSEX, R. M. Thomas and M. A. Cervera, (2002). Scintillation response of global positioning system signals during storm time conditions. *Workshop on Applications of Radio Science (WARS), Australia*
- PAUL A., (2002). Prediction of equatorial ionospheric bubbles in the post-sunset hours. *XXVIIth General Assembly of URSI*
- SMITH R. W., (1998). Low latitude ionospheric effects on radiowave propagation. *Storming Media Reports*
- REINISCH B. W. (1996), Ionosondes. *The Upper Atmosphere. Data Analysis and Interpretation* Springer, 370-381.
- FU, W., S. HAN, CH. RIZOS, M. KNIGHT and A. FINN, (1999). Real-Time Ionospheric Scintillation Monitoring. *The University of New South Wales, Australia*
- ANDERSON, D., and T. FULLER-ROWELL (1999). The Ionosphere. *Space Environment Center. Boulder*
- WIENS, R.H., (2003). The Annual/Diurnal Variation of GPS Scintillation Occurrence over Eritrea. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 5, 08145, 2003
- ERWIN, S.I., (2000). Simulations Predict Environmental Effects on GPS Signals. *National Defense Magazine*
- FEDRIZZI, M., (2001). The Low-Latitude Ionosphere: Monitoring its behaviour with GPS. *University of New Brunswick, Canadá*

NORTHWEST RESEARCH ASSOCIATES, Inc. (1998) Introduction to
Ionospheric Scintillation. www.nwra.com
ESOC WORKING GROUP (2002). CLUSTER AGC Fluctuations Final Report.