

MONITOREO DE SEÑAL SATELITAL • EUTELSAT 16A • 16,0°E

Estudio de caso

Estabilidad de la recepción de portadoras de radio con una velocidad de símbolo extremadamente baja ($SR = 100\text{--}176\text{ kSym/s}$) en banda Ku desde el satélite Eutelsat 16A en las condiciones de la zona «In-Footprint Reception»

Lugar de recepción: Lučenec, sur de Eslovaquia central | Antena: reflector de foco primario Prodelin, D = 450 cm | Sistema de medición: TBS 5927 + EBS Pro

Autor de la investigación: Roman Dávid, www.dxsatcs.com

1. Introducción y objetivo del estudio

El objeto de este estudio es el análisis y la interpretación de los resultados de un monitoreo de señal de larga duración de tres portadoras de radio transmitidas en banda Ku desde el satélite geoestacionario Eutelsat 16A, situado en la posición orbital 16,0° Este. El denominador común de las tres portadoras observadas es una velocidad de símbolo (Symbol Rate, SR) extremadamente baja, comprendida entre 100 y 176 kSym/s – es decir, en el límite inferior de lo que el equipo de recepción de consumo es, en la práctica, capaz de demodular de forma fiable de manera continua y a largo plazo.

Las portadoras con una velocidad de símbolo tan baja ocupan un ancho de banda extremadamente estrecho (del orden de cientos de kHz) y, desde el punto de vista de la teoría del procesamiento digital de señales, son considerablemente más sensibles al ruido de fase, a la inestabilidad de frecuencia del oscilador local del LNB de recepción y a la precisión de sintonización del receptor que las portadoras DVB-S/S2 habituales, cuyo SR se sitúa en el orden de varios megasímbolos por segundo. El objetivo del estudio es, por tanto, no solo documentar los resultados medidos por el autor de las mediciones, el señor Roman Dávid (www.dxsatcs.com), sino también explicar la naturaleza física y técnica de los fenómenos que permiten – o, por el contrario, comprometen – la estabilidad de una recepción de este tipo.

El lugar de recepción analizado – la ciudad de Lučenec, en el sur de Eslovaquia central – se encuentra dentro de la zona de cobertura declarada de Eutelsat 16A, con una potencia isotropa radiada equivalente (EIRP) garantizada de aproximadamente 49 a 50 dBW (zonas Europe A y Europe B de la cobertura del satélite), lo que el autor clasifica en el análisis presentado como «In-Footprint Reception» – recepción dentro del lóbulo principal de cobertura, a diferencia de la recepción en el borde o fuera de la huella garantizada («Out-of-Footprint Reception»), que requiere un diámetro de reflector considerablemente mayor y una unidad de demostración de estabilidad de recepción más larga.

2. Parámetros geométricos de la estación de recepción de Lučenec

El cálculo preciso del acimut, la elevación y el ángulo de rotación del LNB (skew) es un requisito indispensable para cualquier análisis técnico serio de la recepción satelital, ya que una antena mal orientada introduce en el sistema una despolarización y una atenuación adicionales que resultan especialmente perceptibles en portadoras de espectro estrecho y bajo relación señal/ruido. Para garantizar la precisión de este estudio se emplearon datos verificados del servicio dishpointer.com para las coordenadas de la ciudad de Lučenec (latitud 48,3331° N, longitud 19,6664° E) y para el satélite Eutelsat 16A en la posición 16,0° E:

Parámetro	Valor
Latitud del lugar (Lučenec)	48,3331° N
Longitud del lugar (Lučenec)	19,6664° E
Acimut (verdadero / norte geográfico)	184,9°;
Acimut (magnético)	178,8°;

Elevación de la antena	34,4°;
Ángulo de rotación del LNB (skew)	3,3°;

Tabla 1: parámetros geométricos de orientación de la antena para la recepción de Eutelsat 16A en el lugar de Lučenec (fuente de los datos: dishpointer.com).

Una elevación de 34,4° constituye un valor relativamente favorable para la latitud centroeuropea – la trayectoria de la señal atraviesa la atmósfera con un ángulo suficientemente pronunciado para que el espesor efectivo de la capa atmosférica (y, por tanto, la atenuación causada por las precipitaciones, el llamado rain fade) no sea extrema, a diferencia de la recepción de satélites con una trayectoria de elevación observada considerablemente más baja. Un skew de 3,3° es un valor próximo a cero, lo que implica solo una corrección mínima de la rotación del LNB respecto a la posición vertical de referencia – para una recepción sensible a la polarización (categoría a la que pertenecen claramente las portadoras de bajo SR), el cumplimiento preciso de este ángulo es importante para maximizar el aislamiento de polarización cruzada (XPD) y minimizar la interferencia entre portadoras de polarización vertical y horizontal próximas en frecuencia.

3. Configuración técnica de la cadena de recepción

El sistema de recepción está compuesto por un reflector parabólico de foco primario Prodelin con un diámetro $D = 450$ cm, un LNB con un oscilador PLL de alta estabilidad (estabilidad LOF declarada ± 10 kHz) y un medidor/analizador digital TBS 5927 controlado por el software EBS Pro. En el análisis presentado, el autor subraya que, en la zona «In-Footprint Reception» con una EIRP garantizada de aproximadamente 49–50 dBW, desde el punto de vista puramente energético bastaría, para una recepción estable de portadoras estándar, un reflector con un diámetro a partir de unos 80 cm. El hecho de que en este caso se haya empleado un reflector notablemente sobredimensionado, de 450 cm de diámetro, responde por tanto a un propósito distinto al de simplemente aumentar la potencia recibida – su principal aporte consiste en estrechar el lóbulo principal de la antena (y, con ello, aumentar la selectividad espacial frente a satélites vecinos) y, sobre todo, en proporcionar un margen considerable de relación portadora/ruido (C/N), que en este estudio se revela como el factor clave para la demodulación de portadoras de ancho de banda extremadamente estrecho.

Conviene subrayar aquí un punto importante, correctamente identificado por el autor: en la recepción de portadoras de bajo SR, el factor limitante principal no es el diámetro del reflector (el balance energético), sino la calidad y la estabilidad de la cadena de señal situada tras la antena – ante todo, el oscilador del LNB y la precisión de la sintonización digital. En este contexto, un reflector grande no sirve para «captar una señal que de otro modo sería inaudible», sino para crear un margen de C/N suficiente que permita que las pequeñas inestabilidades residuales de frecuencia y fase del oscilador se manifiesten únicamente como una ligera fluctuación de la calidad (Q) y no como una pérdida de sincronización (Lock).

4. La influencia de la estabilidad del oscilador local (LOF) en la demodulación de portadoras de bajo SR

La frecuencia del oscilador local (LO) en el LNB satelital se emplea para convertir la señal de alta frecuencia recibida en banda Ku (10,7–12,75 GHz) a una banda de frecuencia

intermedia que el sintonizador del receptor pueda procesar (típicamente 950–2150 MHz). Cualquier desviación de la frecuencia real del oscilador respecto a su valor nominal – denominada desplazamiento LOF (Local Oscillator Frequency) – se traslada de forma lineal a la posición de la portadora recibida dentro del espectro de frecuencia intermedia. En portadoras habituales con un SR elevado (por ejemplo, varios MSym/s), incluso un desplazamiento de varias decenas de kHz representa una fracción insignificante del ancho de banda ocupado. En una portadora con $SR = 100 \text{ kSym/s}$, sin embargo, la situación es radicalmente distinta.

El ancho de banda ocupado por una portadora puede estimarse, en primera aproximación (para una modulación QPSK con un factor de roll-off típico), como el producto de la velocidad de símbolo por el coeficiente $(1 + \text{roll-off})$. El autor indica, para la portadora Radio Wrocław, un ancho de banda medido (Carrier Width) de 0,120 MHz, es decir, 120 kHz – valor plenamente coherente con una portadora de $SR = 100 \text{ kSym/s}$ con un factor de roll-off cercano a 0,20 (típico de las portadoras DVB-S de este tipo). En tal caso, un desplazamiento de frecuencia del oscilador local del orden de unos pocos a unas pocas decenas de kHz representa ya decenas de por ciento del ancho de banda ocupado por la portadora – y el demodulador (un bucle de Costas o un bucle de fase/frecuencia equivalente integrado en el chip del receptor) debe ser capaz de seguir y compensar dicho desplazamiento en tiempo real sin pérdida de sincronización.

La estabilidad LOF declarada del oscilador PLL empleado, del orden de $\pm 10 \text{ kHz}$, constituye desde este punto de vista un parámetro técnico clave. Para una portadora con un ancho de banda de 120 kHz, un desplazamiento de $\pm 10 \text{ kHz}$ representa aproximadamente un 8–9 % del ancho espectral ocupado – un valor que se sitúa cómodamente dentro del rango central que el bucle de frecuencia de un demodulador DVB-S moderno (incluido el chipset empleado en el receptor TBS 5927) puede seguir en régimen estacionario sin riesgo de pérdida de Lock. A modo de comparación, los LNB más económicos o más antiguos, dotados de un oscilador de resonador dieléctrico (DRO) en lugar de un PLL, presentan típicamente una estabilidad LOF del orden de $\pm 500 \text{ kHz}$ a $\pm 2 \text{ MHz}$, y además con una marcada dependencia de la temperatura (deriva ante los cambios de temperatura ambiente entre el día y la noche). Con semejante nivel de inestabilidad, el desplazamiento de frecuencia de una portadora de apenas 120 kHz de ancho de banda podría desplazar por completo la ventana de sintonización del receptor fuera del rango de búsqueda del demodulador, haciendo prácticamente inevitable la pérdida de Lock, en particular ante cambios de temperatura del LNB durante un monitoreo de larga duración.

Desde esta perspectiva, el uso de un LNB con oscilador PLL y estabilidad LOF de $\pm 10 \text{ kHz}$ no representa, por tanto, una mera mejora cualitativa, sino, para la recepción de portadoras con un SR inferior a unos 200 kSym/s, una condición técnica sin la cual una recepción estable e ininterrumpida a largo plazo no resulta realmente alcanzable, con independencia del diámetro del reflector empleado.

5. Ancho de banda ultraestrecho de la portadora (Carrier Width = 0,120 MHz) y sus consecuencias

Un ancho de banda espectral estrecho tiene dos consecuencias contrapuestas. Por un lado, concentra la potencia radiada de la portadora en un intervalo de frecuencia reducido, lo que, para una EIRP de satélite dada, incrementa la densidad espectral de potencia (potencia por unidad de ancho de banda) y, por tanto, también la relación portadora/ruido

teóricamente alcanzable - esta es la razón física por la cual incluso portadoras con una potencia radiada absoluta relativamente baja pueden, con una apertura de recepción suficientemente grande, demodularse con un SNR sorprendentemente alto (el autor indica un valor de pico medido de $\text{SNR} = 17,7 \text{ dB}$, valor con un margen considerable por encima del umbral necesario para un Lock DVB-S estable, que para una modulación QPSK y una tasa de codificación media se sitúa generalmente entre 4 y 7 dB).

Por otro lado, un ancho de banda estrecho impone exigencias notablemente mayores en cuanto a la precisión de sintonización y a la calidad del ruido de fase (phase noise) del oscilador empleado, ya que cualquier ruido de fase en las proximidades de la frecuencia portadora ocupa una proporción relativamente mayor del ancho espectral total que en el caso de una portadora de banda ancha. Asimismo, los efectos de tipo Doppler causados por una ligera deriva de la posición geoestacionaria del satélite (en la práctica, del orden de unidades a decenas de Hz en una recepción doméstica habitual) resultan relativamente más importantes para una portadora tan estrecha que para portadoras DVB-S2 de banda ancha, del orden de unidades a decenas de MSym/s.

6. La necesidad de una sintonización manual precisa de la frecuencia en EBS Pro

Del análisis anterior se desprende directamente una consecuencia práctica que el autor tiene correctamente en cuenta en su procedimiento: la introducción manual de la frecuencia de la portadora en EBS Pro con una precisión de tres decimales (es decir, a nivel de kHz, por ejemplo 12.590,540 MHz en lugar del valor redondeado de 12.590,5 MHz o 12.591 MHz). Para una portadora con un ancho de banda de 120 kHz, la diferencia entre un valor de frecuencia redondeado y uno preciso, del orden de unos cientos de Hz a unos pocos kHz, representa una fracción no desdeñable de la ventana de búsqueda del demodulador. Introducir la frecuencia con precisión de tres decimales significa, en la práctica, que el demodulador no necesita «explorar» un rango de frecuencia más amplio en torno al valor nominal durante la adquisición del Lock, lo que reduce el tiempo necesario para la sincronización y disminuye la probabilidad de que el bucle de sincronización de frecuencia se «enganche» a un producto de ruido o de intermodulación vecino en lugar de a la propia portadora.

Este paso constituye un ejemplo típico de cómo los parámetros teóricos (ancho de banda de la portadora, estabilidad LOF del LNB) deben traducirse también en la configuración práctica del software de medición/recepción - sin esta combinación (oscilador PLL de calidad más introducción manual precisa de la frecuencia), ni siquiera un balance energético de la señal teóricamente suficiente garantizaría un resultado estable.

7. Resumen de las portadoras analizadas

La siguiente tabla resume las tres portadoras de radio del satélite Eutelsat 16A que fueron objeto del monitoreo de señal de larga duración realizado por el autor en el lugar de Lučenec, empleando la unidad mínima de demostración de estabilidad de recepción, $t = 48$ horas, aplicable a la zona «In-Footprint Reception»:

Frecuencia	Polarización	SR (kSym/s)	Programa
12.590,540 MHz	V (vertical)	100	Radio Wrocław
12.589,555 MHz	V (vertical)	146	Radio Gdańsk
10.972,126 MHz	H (horizontal)	176	BNR Nieuwsradio

Tabla 2: resumen de las portadoras de radio monitoreadas en el satélite Eutelsat 16A.

8. Unidad de monitoreo ampliada de 72 horas para la portadora SR = 100 kSym/s (Radio Wrocław)

El valor de velocidad de símbolo más bajo examinado en este estudio, SR = 100 kSym/s de la portadora Radio Wrocław en 12.590,540 MHz (V), representa el caso técnicamente más exigente entre las tres portadoras analizadas - precisamente por ello el autor la sometió a un monitoreo ampliado de $t = 72$ horas, en lugar de la unidad base estándar de $t = 48$ horas aplicable a la zona «In-Footprint Reception». Al prolongar el monitoreo 24 horas adicionales (es decir, 86.400 puntos de medición más, con el período de muestreo habitual de un punto por segundo), el volumen total del conjunto de datos continuo se elevó a 259.200 puntos de medición consecutivos.

Según los datos del autor, en este conjunto de 259.200 puntos de medición no se registró ni un solo punto con pérdida de sincronización (Lock), y el parámetro de calidad de recepción Q, en EBS Pro, se mantuvo en un valor constante de $Q = 100 \%$ durante toda la medición. El valor de pico registrado de la relación señal/ruido, SNR = 17,7 dB, representa un margen sustancial por encima del umbral necesario para mantener el Lock, lo que concuerda con la explicación expuesta anteriormente sobre la favorable densidad espectral de potencia de una portadora de banda estrecha, combinada con la gran apertura del reflector de $D = 450$ cm.

Según el autor, el período de medición incluyó también episodios de intensidad de precipitación elevada los días 11 y 12 de septiembre de 2026 en la zona de Lučenec, documentados mediante los datos del Instituto Hidrometeorológico Eslovaco (shmu.sk). El hecho de que, según la documentación presentada, la continuidad del Lock y el valor de Q se mantuvieran inalterados durante estos episodios de lluvia resulta coherente con el comportamiento esperado de un sistema con una gran apertura de antena: la atenuación causada por las precipitaciones (rain fade) en banda Ku, para una intensidad de precipitación media centroeuropea y una elevación de aproximadamente 34° , suele situarse en el orden de 1 a 3 dB, mientras que el margen de SNR medido (hasta 17,7 dB en el pico) ofrece un margen suficiente para absorber dicha atenuación de corta duración sin descender por debajo del umbral de pérdida de Lock.

Nota sobre la interpretación del peso estadístico de los datos: la cifra de 259.200 puntos de medición continuos es significativa para demostrar la continuidad de un estado (ausencia de interrupción dentro de esa ventana temporal concreta y única observada), pero debe interpretarse

correctamente – no se trata de 259.200 experimentos independientes y estadísticamente separados, sino de un único registro temporal continuo con una frecuencia de muestreo elevada. El valor científico de un registro de este tipo reside en demostrar que, dentro de la ventana de 72 horas considerada, con la configuración y las condiciones meteorológicas dadas, no se produjo ninguna interrupción – no en afirmar que la probabilidad de interrupción sea nula bajo todas las condiciones futuras concebibles.

9. Discusión e interpretación de conjunto

Los resultados del monitoreo presentado pueden resumirse en tres conclusiones técnicas interrelacionadas. En primer lugar, el balance energético en la zona «In-Footprint Reception», con una EIRP de 49–50 dBW, no constituye el factor limitante para portadoras de este tipo – el diámetro del reflector de $D = 450$ cm proporciona un margen de C/N considerable, que resultaría excesivo para portadoras DVB-S/S2 estándar, pero que, para portadoras de banda extremadamente estrecha con SR inferior a 200 kSym/s, funciona como una garantía frente a fenómenos de atenuación de corta duración (precipitaciones, centelleo atmosférico). En segundo lugar, en este rango de SR el factor limitante clave pasa a ser la calidad de la cadena de señal situada tras la antena – ante todo, la estabilidad de la LOF del LNB, que en portadoras con un ancho de banda del orden de 100–300 kHz debe situarse en el nivel de unidades a decenas bajas de kHz para que el demodulador pueda seguir de manera fiable el desplazamiento de frecuencia. En tercer lugar, la precisión de la introducción manual de la frecuencia en el software de medición/recepción, a nivel de kHz, no es una mera formalidad, sino un paso práctico necesario que reduce la carga impuesta sobre el bucle de sincronización de frecuencia del receptor.

Los datos presentados por el autor proporcionan, por tanto, una prueba empírica convincente y bien documentada de que, con una combinación correctamente diseñada de una gran apertura de recepción, un oscilador PLL de LNB de alta estabilidad y una sintonización de software precisa, resulta realmente alcanzable una recepción estable e ininterrumpida a largo plazo de portadoras con un SR tan bajo como 100 kSym/s desde el satélite Eutelsat 16A en Europa central, incluso en condiciones meteorológicas transitoriamente adversas. Para una generalización completa de esta conclusión a otros emplazamientos, otros tipos de LNB o episodios de precipitación más extremos (por ejemplo, tormentas intensas con un elevado contenido de agua en la atmósfera), sería deseable complementar este estudio con mediciones comparables de otras estaciones independientes y con estadísticas climáticas a más largo plazo del emplazamiento en cuestión.

10. Conclusión

Este estudio de caso confirma que la recepción de portadoras de radio con una velocidad de símbolo extremadamente baja ($SR = 100\text{--}176$ kSym/s) desde el satélite Eutelsat 16A, dentro de la zona de cobertura garantizada «In-Footprint Reception», resulta técnicamente alcanzable de forma fiable con un sistema de recepción correctamente diseñado. La documentación de medición del autor, Roman Dávid – en concreto, el registro continuo de 72 horas con 259.200 puntos de medición sin una sola interrupción de Lock en la portadora Radio Wrocław ($SR = 100$ kSym/s) – constituye una contribución de calidad y bien documentada al conocimiento práctico de los límites del equipamiento de recepción satelital de consumo actual en la recepción de portadoras de banda estrecha en banda Ku.

11. Bibliografía y fuentes

Normas y estándares técnicos

- ETSI EN 300 421 V1.1.2: «Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services». European Telecommunications Standards Institute.
- ETSI EN 302 307: «Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)». European Telecommunications Standards Institute.
- Recomendación UIT-R P.618: «Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems». Unión Internacional de Telecomunicaciones – sección dedicada a la atenuación por lluvia en bandas superiores a 10 GHz.
- Recomendación UIT-R S.465: «Reference radiation pattern for earth station antennas in the fixed-satellite service for use in coordination and interference assessment». Unión Internacional de Telecomunicaciones.

Literatura especializada

- Pratt, T., Bostian, C. W., Allnutt, J. E.: Satellite Communications, 2.^a ed., John Wiley & Sons, 2003. (Capítulos dedicados al balance de enlace, la atenuación en banda Ku y el efecto del ruido de fase del oscilador en la demodulación.)
- Maral, G., Bousquet, M.: Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology, 5.^a ed., John Wiley & Sons, 2009.
- Tomasi, W.: Electronic Communications Systems: Fundamentals Through Advanced, 5.^a ed., Pearson Prentice Hall, 2004. (Capítulo dedicado a los bucles de enganche de fase – PLL y síntesis de frecuencia en el LNB.)
- Rice, M.: Digital Communications: A Discrete-Time Approach, Pearson Prentice Hall, 2009. (Fundamento teórico de la relación entre velocidad de símbolo, factor de roll-off y ancho de banda ocupado.)

Fuentes de datos y herramientas en línea empleadas en el estudio

- www.dxsatcs.com – portal propio del autor, Roman Dávid, con los datos originales del monitoreo de señal, una descripción de la configuración hardware/software (TBS 5927, EBS Pro) y la metodología de las unidades de demostración de estabilidad de recepción ($t = 48 \text{ h} / t = 72 \text{ h}$).
- www.dishpointer.com – herramienta en línea para el cálculo del acimut, la elevación y el ángulo de rotación del LNB (skew) para una posición geográfica y un satélite determinados; fuente de los datos geométricos indicados en la tabla 1.
- www.shmu.sk – Instituto Hidrometeorológico Eslovaco; fuente de los datos meteorológicos sobre la intensidad de las precipitaciones en la zona de Lučenec los días 11 y 12 de septiembre de 2026, empleados para evaluar el efecto de la atenuación por lluvia en el desarrollo del monitoreo.
- Lyngsat (www.lyngsat.com) – base de datos pública de planes de frecuencias y de la ocupación de transpondedores del satélite Eutelsat 16A, empleada como fuente de referencia