

RECOMENDACIÓN UIT-R M.1087

MÉTODOS PARA EVALUAR LA COMPARTICIÓN ENTRE SISTEMAS DEL SERVICIO MÓVIL TERRESTRE Y SISTEMAS DEL SERVICIO MÓVIL POR SATÉLITE CON SATÉLITES EN ÓRBITA BAJA QUE UTILIZAN TÉCNICAS DE ESPECTRO ENSANCHADO POR DEBAJO DE 1 GHz

(Cuestiones UIT-R 83/8 y UIT-R 84/8)

(1994)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones para examinar la atribución de frecuencias en ciertas partes del espectro (Málaga-Torremolinos, 1992) (CAMR-92) ha efectuado atribuciones de frecuencias al servicio móvil por satélite con satélites en órbita terrestre baja (LEO MSS) por debajo de 1 GHz;
- b) que en estas bandas se prevé la compartición de frecuencias con otros servicios;
- c) que el SMS LEO puede proporcionar a una amplia población importantes servicios de radiocomunicaciones tales como alertas de emergencia (sin embargo, estos servicios no deben identificarse como servicios de seguridad, como indica el Reglamento de Radiocomunicaciones) y determinación de la posición geográfica;
- d) que los satélites en órbita terrestre baja proporcionan una plataforma práctica para los equipos de comunicaciones en el espacio;
- e) que los sistemas del SMS de baja potencia que utilizan modulación de espectro ensanchado y secuencia directa contribuyen mínimamente a incrementar el nivel de ruido global en estas bandas. No obstante, en las proximidades de las estaciones terrenas móviles puede producirse una importante emisión de radiofrecuencia;
- f) que las técnicas de espectro ensanchado son técnicamente posibles y pueden constituir un medio de compartición entre los actuales servicios móviles y los servicios móviles por satélite de baja potencia y coeficiente de utilización reducido,

recomienda

1. que se utilicen los métodos descritos en el anexo para el análisis de la compartición entre el servicio móvil terrestre y el servicio móvil por satélite que emplea satélites en órbita baja con técnicas de espectro ensanchado por debajo de 1 GHz.

ANEXO 1

Métodos para examinar la influencia de las emisiones de radiofrecuencia entre los sistemas móviles terrestres y los sistemas del servicio móvil por satélite con satélites en órbita baja que utilizan técnicas de espectro ensanchado por debajo de 1 GHz**1 Introducción**

En este anexo se consideran los métodos mediante los cuales los sistemas del SMS LEO que utilizan técnicas de espectro ensanchado pueden compartir el espectro radioeléctrico con usuarios de los servicios móviles terrestres en las bandas por debajo de 1 GHz atribuidas por la CAMR-92 al SMS. Estas bandas están atribuidas actualmente al servicio de meteorología por satélite, al servicio móvil y a algunos otros servicios de radiocomunicaciones.

Como aplicación de los métodos indicados en este anexo, en los apéndices figuran dos ejemplos típicos de sistemas SMS LEO que utilizan técnicas de espectro ensanchado. El apéndice 1 describe los parámetros típicos de dos sistemas SMS LEO de espectro ensanchado. El apéndice 2 muestra cómo se pueden aplicar estos métodos.

2 Método de compartición entre los servicios móviles terrestres existentes y los enlaces Tierra-espacio de espectro ensanchado del SMS LEO (148-149,9 MHz)

La compartición mutua entre los servicios móviles terrestres y los sistemas del SMS LEO de espectro ensanchado viene facilitada por:

- la utilización de modulación de espectro ensanchado que es capaz inherentemente de aceptar interferencia adicional procedente de otras fuentes;
- la directividad de las antenas de las estaciones en tierra fijas del SMS (una antena Yagi con ganancia de 18 dB cubre únicamente el 9,8% del cielo);
- la huella constantemente móvil de la zona de recepción del satélite del SMS LEO a través de la superficie de la Tierra, que minimiza su exposición a la interferencia más fuerte procedente de los transmisores instalados en la superficie;
- la reaparición casi continua de otros satélites del conjunto, que pueden establecer los enlaces de comunicaciones necesarios desde posiciones de satélite menos expuestas a la interferencia;
- las limitaciones del tiempo durante el cual pueden producirse transmisiones del terminal del SMS (se ha sugerido un valor de hasta 500 ms);
- las limitaciones del coeficiente de utilización (se ha sugerido un valor del 1% de 1 a 15 min).

Las señales procedentes de los usuarios móviles terrestres asignados actualmente a la banda del enlace ascendente propuesta son normalmente señales de banda estrecha (16 kHz o menos). Los transmisores móviles terrestres, especialmente las estaciones de base, son de alta potencia en comparación con los terminales de usuario de los sistemas del SMS propuestos. En consecuencia, el SMS debe ser razonablemente inmune a las señales móviles terrestres.

La incidencia de la interferencia de los terminales móviles terrestres se observará principalmente en el enlace ascendente utilizado por los pequeños terminales de usuario que transmiten al satélite. En el apéndice 2 figura un ejemplo de balance de potencia/ruido del enlace ascendente de un terminal móvil del SMS típico en la banda 148,0-149,9 MHz para demostrar la aplicación de estos métodos.

2.1 *Análisis de la interferencia producida por un sistema del SMS de espectro ensanchado a un sistema móvil terrestre en la banda de ondas métricas*

En el enlace Tierra-espacio, las estaciones de control y de adquisición de datos del SMS y los terminales de usuario móvil del SMS pueden causar interferencia a las estaciones móviles terrestres. El análisis de interferencia se realiza de forma separada para el terminal móvil terrestre y para la estación de base móvil terrestre utilizando dos criterios:

- la distancia de separación requerida para la protección del receptor móvil terrestre;
- las consideraciones estadísticas, que suponen una población de usuarios móviles del SMS con distribución uniforme.

A continuación se indica la ecuación que debe aplicarse. Su objeto es calcular la intensidad de campo eléctrico a una distancia especificada entre antenas de alturas conocidas. Sustituyendo los valores para la máxima intensidad de campo eléctrico deseada, la fórmula puede resolverse para la distancia de separación.

$$d = \sqrt{\frac{88h_1h_2\sqrt{P}}{\lambda E}}$$

siendo:

- E : sensibilidad del receptor que debe protegerse (V/m)
- P : p.i.r.e. de la señal interferente en una banda de 4 kHz (W/4 kHz)
- d : distancia entre antenas (m)
- h_1, h_2 : alturas de las antenas (m) (normalmente se utiliza el valor de 10 m² como el producto de alturas de antenas)
- λ : longitud de onda (m).

El campo eléctrico que debe protegerse es:

$$E = \sqrt{120\pi 10^{(dfp/10)}}$$

siendo:

$$dfp: 150 \text{ dB(W/m}^2\text{/4 kHz)} \text{ (de acuerdo con los números 608A y 608B del RR)}$$

2.2 *Análisis de la interferencia producida por el servicio móvil terrestre en un sistema del SMS LEO de espectro ensanchado*

Para determinar los efectos de la interferencia causada por la transmisión de usuarios de los servicios móviles terrestres en la banda 148,0-149,9 MHz, pueden utilizarse métodos de cálculo y experimentales.

Un satélite con una carga útil consistente en un repetidor adecuado puede colocarse en órbita terrestre baja. El análisis de las señales repetidas permite caracterizar el tráfico de los servicios móviles en la banda en cuestión. La experimentación limitada con señales de espectro ensanchado puede confirmar igualmente el análisis del balance del enlace.

Para calcular el efecto de la interferencia causada por las transmisiones de los usuarios de los servicios móviles terrestres en la banda 148,0-149,9 MHz, se supone en primer lugar que estos usuarios presentan una distribución uniforme en el interior de la huella de la antena del satélite. Los usuarios más próximos al punto subsatelital experimentarán menores pérdidas en el espacio, pero el diagrama de la antena del satélite puede conformarse para compensar parcialmente el efecto de la distancia. Se ha elaborado una expresión que tenga en cuenta estas consideraciones para realizar una estimación del ruido total inducido por otros servicios en un sistema del SMS LEO.

Tomando dicho modelo para estudiar el nivel de interferencia, puede establecerse un balance del enlace detallado que incluya los efectos de la ubicación del usuario del SMS (en término de ángulos de elevación con respecto al satélite) y la contribución de ruido procedente de todas las fuentes, incluida la autointerferencia del SMS así como la interferencia causada por los usuarios existentes. Experimentando con distintos valores para el ángulo de elevación usuario-satélite, pueden determinarse para diversos niveles de interferencia, valores de dicho ángulo que producen un margen de funcionamiento positivo. Este método se demuestra en el apéndice 2 para parámetros de sistema típicos.

Los diseñadores de los sistemas del SMS LEO deben tener en cuenta la posibilidad de que en el futuro aumente el tráfico en los servicios móviles.

2.2.1 *Ruido total producido por el servicio móvil terrestre en un sistema del SMS LEO de espectro ensanchado*

Conviene calcular la potencia total observada en el satélite S (véase la fig. 1) procedente de un elevado número de emisores, N_e , distribuidos uniformemente en el casquete esférico determinado incluido en la huella del satélite. Sin embargo, dicha huella tiene una superficie mayor que algunos continentes y, además, en el mar no existe el servicio móvil terrestre. Por consiguiente, pueden distribuirse los N_e emisores en una zona de superficie aproximada a la de la parte continental de los Estados Unidos de América; un área con un ángulo central de 40° ($\beta = 20^\circ$).

El área de un casquete esférico de ángulo central β es:

$$\text{Área} = 2\pi R^2 (1 - \cos \beta) = a$$

Por consiguiente, la densidad de emisores es:

$$\text{Densidad} = \frac{N_e}{\text{Área}} = \frac{N_e}{2\pi R^2 (1 - \cos \beta)}$$

y el número de emisores en un área incremental, da :

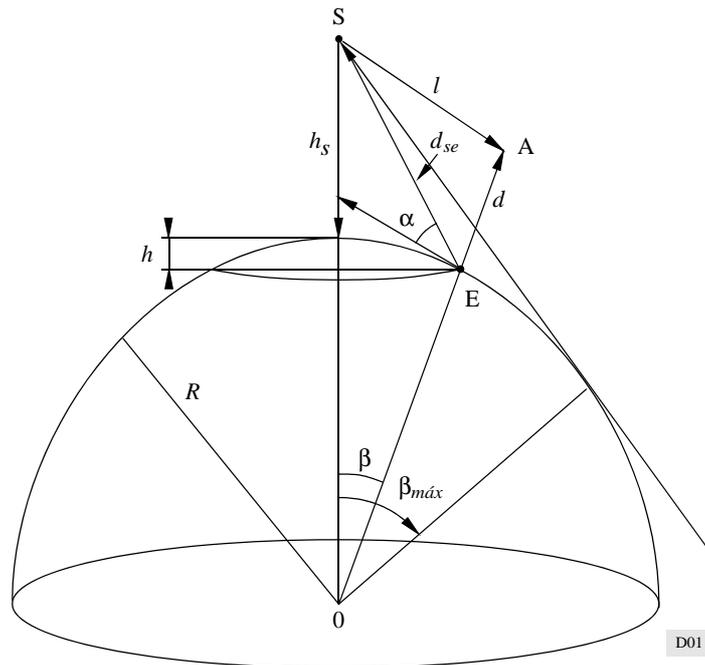
$$da = 2\pi R^2 \sin \beta d\beta$$

es:

$$dN = \text{densidad} \times da = \frac{N_e \sin \beta d\beta}{1 - \cos 20^\circ}$$

siendo β : ángulo subtendido en el centro de la Tierra entre el satélite (S) y el emisor (E).

FIGURA 1
Geometría para obtener la ecuación del ruido total



La antena receptora del satélite tiene un diagrama de radiación que compensa parcialmente las pérdidas en el espacio superiores en 9 dB experimentadas por las estaciones con un ángulo de elevación de 5° en comparación con las estaciones situadas directamente bajo el satélite. Como ejemplo, el modelo de ganancia de antena en función del ángulo de elevación puede ser:

$$G_{\text{dB}}(\alpha) = 6,5 - \frac{39}{\pi} \alpha$$

siendo:

α : ángulo de elevación (radianes)

G_{dB} : ganancia (dB).

La ganancia del satélite puede expresarse en términos del ángulo β subtendido en el centro de la Tierra entre el satélite S y el transmisor E. Por consiguiente,

$$G_{\text{dB}}(\beta) = 6,5 - \frac{39}{\pi} \arctg\left(\frac{1}{\text{tg } \beta} - \frac{1}{r \text{ sen } \beta}\right)$$

con:

$$r: 1 + h_s/R$$

donde:

h_s : la altura del satélite

R : radio de la Tierra.

La potencia recibida en el satélite procedente de un transmisor individual es la potencia emitida por dicho transmisor menos las pérdidas del trayecto (PL) entre el transmisor y el satélite, que vienen dadas por la expresión:

$$PL_{\text{dB}} = 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d_{se}}\right)$$

o como la relación:

$$PL = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_{se}}\right)^2$$

Las pérdidas del trayecto pueden expresarse en función de la atenuación A correspondiente a la altura del satélite; es decir, con un ángulo de elevación de 90° :

$$A = \left(\frac{\lambda}{4\pi h_s} \right)^2$$

por consiguiente:

$$PL = A \frac{h_s^2}{d_{se}^2}$$

la consideración de la geometría de la figura da lugar a la siguiente expresión para las pérdidas del trayecto:

$$PL = \frac{A(r - 1)^2}{r^2 + 1 - 2r \cos \beta}$$

siendo:

$$A = PL \text{ a } h_s.$$

El producto de la potencia media del transmisor (P_1), las pérdidas del trayecto, la ganancia de antena y el número incremental de transmisores integrados en el casquete esférico de ángulo central β proporciona la potencia total interferente en el satélite.

Es decir

$$P_{TOT} = \frac{P_1 N_e A(r - 1)^2}{1 - \cos 20^\circ} \int_0^{\beta_{m\acute{a}x}} \frac{10^{-\left[\frac{39}{\pi} \arctan \left(\frac{1}{\tan \beta} - \frac{1}{r \sin \beta} \right) - 6,5 \right] / 10}}{r^2 + 1 - 2r \cos \beta} \sin \beta \, d\beta$$

A continuación debe determinarse un valor que represente el número de fuentes interferentes N_i .

Suponiendo un tráfico de μ Erlang por estación, la probabilidad de que i estaciones transmitan simultáneamente viene dada por la ley binomial:

$$p(i) = \binom{N_e}{i} \mu^i (1 - \mu)^{N_e - i}$$

siendo N_e el número total de estaciones transmisoras. Si N_e tiene un valor suficientemente grande y μ toma un valor reducido, $p(i)$ tiende a ser una expresión de la ley de Poisson (tráfico telefónico).

En este caso, $p(i)$ es una ley normal con un valor medio m ($m = N_e \mu$) y una varianza de $\sigma^2 = N_e \mu (1 - \mu)$.

Para obtener el número de transmisores simultáneos N_i que se rebasarán con una probabilidad del 1%, se realiza el cálculo de la forma siguiente:

$$N_i = m + 2,3\sigma$$

$$N_i = N_e \mu + 2,3\sqrt{N_e \mu (1 - \mu)}$$

A continuación puede establecerse un cuadro con los valores de la densidad portadora/ruido (CND) para diversos niveles de N_i y distintas suposiciones de tráfico. Esta densidad se calcula restando la potencia de ruido interferente de la potencia de la señal deseada. Por consiguiente,

$$CND = p.i.r.e.deseada - PL - \text{otras pérdidas} + \text{ganancia en recepción} - P_{ruido}$$

En el apéndice 2 aparece un ejemplo de este cálculo.

2.2.2 Análisis de la calidad de funcionamiento global de un sistema del SMS LEO de espectro ensanchado

En este punto se analiza y resume la calidad de funcionamiento de un sistema SMS LEO de espectro ensanchado para los enlaces de ida y vuelta (Tierra-espacio y espacio-Tierra) en presencia de ruido térmico, de la interferencia procedente de otros usuarios del sistema SMS LEO y de la interferencia provocada por transmisores móviles terrenales. En los sistemas que utilizan técnicas de espectro ensanchado totalmente, los canales de ida y vuelta emplean el mismo transpondedor y las mismas frecuencias y constituyen la interferencia dentro del sistema para las portadoras deseadas que deben recibirse en la estación central y en los terminales de usuario. En consecuencia, los balances de radiofrecuencia se calculan considerando todas las posibles interferencias y el modelo utilizado servirá, en definitiva, para optimizar el diseño del sistema.

En el apéndice 2 aparecen los balances de ida y vuelta de los enlaces ascendente y descendente utilizando valores conservadores para lograr unos márgenes del sistema adecuados.

Es conveniente seguir detalladamente un cálculo completo de la densidad portadora/ruido (*CND*) compuesta, incluyendo los efectos de todas las fuentes interferentes; dicho cálculo aparece en el apéndice 2. En este punto se describe el método global.

Una vez calculado el nivel de portadora para cada uno de los cuatro enlaces (enlace ascendente de ida, enlace descendente de ida, enlace ascendente de vuelta y enlace descendente de vuelta) puede considerarse la interferencia en cada enlace como la suma de todas las portadoras no deseadas en el receptor. Se calcula la relación portadora/ruido (*C/N*) resultante de cada una de las fuentes de interferencia y se añaden las diversas potencias de ruido equivalente. Las densidades portadora/ruido se combinan utilizando la habitual recíproca de la suma de las fórmulas recíprocas. Cabe señalar que los niveles de ruido se calculan por Hz de anchura de banda. Para una anchura de banda de 1,0 MHz esta circunstancia añade 60 dB a las densidades portadora/ruido y proporciona la ganancia «ensanchada».

Como ejemplo puede calcularse la densidad total portadora/ruido (*CND*), en el canal del enlace ascendente de ida. Se determina la relación C/N_0 resultante considerando el ruido térmico. La señal deseada en este caso tiene un nivel de portadora de C_f dBW. El ruido debido a la interferencia procedente del enlace ascendente de vuelta es n veces el nivel de la portadora de vuelta C_r , siendo n el número de usuarios simultáneos. Extendido en una anchura de banda B , este ruido es:

$$N = 10 \log n + C_r - 10 \log B$$

lo que origina una $(CND)_1$ de $C_f - N$. En este mismo enlace, existe también interferencia procedente de otros $(m - 1)$ canales del enlace ascendente con distintos códigos de ensanchamiento ($m =$ número de códigos de ensanchamiento utilizados).

Las portadoras no deseadas contribuyen:

$$N_2 = 10 \log(m - 1) + C_f - 10 \log B$$

al ruido, lo que da:

$$(CND)_2 = C_f - N_2 \quad \text{dBHz}$$

La *CND* de los sistemas móviles terrestres interferentes contribuye al ruido en función de la intensidad de tráfico. Para el caso de E Erlang en el enlace de ida, $(CND)_3$ puede calcularse como se indica en el punto anterior.

A continuación se calcula de la forma siguiente la relación *C/N* compuesta para el enlace ascendente de ida:

$$1/(CND) = 1/(CND)_0 + 1/(CND)_1 + 1/(CND)_2 + 1/(CND)_3$$

Obsérvese que para el sistema combinado de espectro ensanchado/banda estrecha, no hay que considerar ninguna portadora no deseada ni sistemas terrenales móviles y fijos interferentes.

Tras determinar la *CND* compuesta para los enlaces ascendente y descendente, puede calcularse el valor global «ascendente y descendente» compuesto por la misma técnica. Esta cifra debe compararse con el valor necesario al que puede llegarse fácilmente a partir de la velocidad binaria R_b y el valor práctico de E_b/N_0 .

En consecuencia,

$$(CND)_{necesaria} = E_b/N_0 + R_b$$

Y el margen de la *CND* es:

$$\text{Margen} = (CND) - (CND)_{necesaria}$$

En el apéndice 2 aparece un análisis completo para un nivel de tráfico de interferencia de 0,05 E. El balance de enlace indicado incluye el efecto del ángulo de elevación sobre el margen de interferencia. Es decir, para un nivel determinado de tráfico de interferencia, puede encontrarse un ángulo de elevación en el cual el sistema en órbita terrestre baja tenga un margen de funcionamiento positivo. Cualquier terminal de usuario del SMS situado dentro del cono definido por el ángulo de elevación especificado puede funcionar con un margen positivo.

El análisis puede repetirse para distintos valores de tráfico de interferencia para obtener valores de zona de servicio en función de la interferencia. Considerando el ejemplo obtenido por este método de análisis puede observarse que un SMS LEO de espectro ensanchado resiste razonablemente los aumentos de interferencia.

2.2.3 *Métodos para disminuir la posible interferencia causada a un sistema del SMS LEO de espectro ensanchado por transmisores de alta potencia y banda estrecha*

Los cálculos anteriores suponen que todas las señales interferentes están distribuidas en el espectro en forma de ruido. En este caso, las estaciones de base de los sistemas móviles aparecerán en el sistema del SMS LEO como fuentes perturbadoras de alta potencia y banda estrecha. Se conocen técnicas para combatir los efectos de tales fuentes. Una técnica consiste en localizar la frecuencia de la fuente perturbadora y a continuación atenuar sus efectos mediante un filtro de ranura. Con las técnicas de procesamiento digital de la señal es fácil ubicar en el espectro de frecuencias las fuentes interferentes de alta potencia y banda estrecha. Debe calcularse la transformada rápida de Fourier (FFT). Las señales en cuestión están confinadas en una banda de un megahertzio. Trasladando la señal hasta la banda comprendida entre 0 y 1 MHz, las señales entran dentro de la gama de frecuencias en la que los circuitos integrados del procesador digital de la señal pueden calcular la FFT a medida que las señales se reciben en un procesador de canalización. El recorte de las pocas crestas abruptas que aparecerán cuando estén presentes las señales de alta potencia y banda estrecha produce el mismo efecto que el empleo de filtros de ranura. A continuación las señales pueden volver a convertirse al dominio del tiempo mediante una FFT inversa. El cálculo puede realizarse por un dispositivo de procesamiento de señal común utilizado para llevar a cabo la correlación cruzada, el seguimiento Doppler y las transformadas de Fourier. Como los filtros de ranura producen una pequeña distorsión de la señal deseada, probablemente se utilizarán sólo en el caso de las interferencias más acusadas. Si no se emplea más que el equivalente a diez de dichos filtros, no deben aparecer problemas con la detección de la señal una vez efectuada la FFT inversa.

Para un intervalo de tiempo particular, debe determinarse la probabilidad de que un cierto número de estaciones de base transmitan durante dicho intervalo. Los intervalos de datos son breves en comparación con el tiempo de retención medio del usuario móvil terrestre promedio. Por consiguiente, conviene considerar la probabilidad de que se inicien k transmisiones en cualquier intervalo de tiempo de retención medio. Si durante dicho intervalo se inician k transmisiones, en algún instante de tiempo dentro de ese intervalo de tiempo de retención todos se encontrarán transmitiendo simultáneamente.

La fórmula adecuada para calcular la probabilidad de que se produzcan k transmisiones en un intervalo de tiempo t considerando n usuarios potenciales es:

$$p = \binom{n}{k} p^k q^{(n-k)}$$

siendo

- n : número total de usuarios activos
- k : número de transmisiones en el intervalo designado
- p : probabilidad de que una estación se encuentre activa en el intervalo t
- $q = (1 - p)$: probabilidad de que una estación se encuentre inactiva
- $\binom{n}{k}$: coeficiente binómico.

Como el sistema de rechazo de interferencia de banda estrecha propuesto rechazará únicamente las estaciones de base que presenten la señal máxima dirigida hacia el satélite, debe calcularse la probabilidad de rebasar un cierto número de estaciones activas en un intervalo de tiempo determinado para varios casos. Por ejemplo, si 200 estaciones presentan una potencia superior al umbral de recorte, la probabilidad de que más de 10 estaciones se encuentren activas simultáneamente (y por consiguiente sean recortadas) es del 5%. Si 150 estaciones tienen potencia suficiente para rebasar el umbral de recorte, la probabilidad de recortar más de 10 estaciones es sólo del 0,1% aproximadamente.

Cuando se aplica la técnica de recorte y la FFT, aparecerá distorsión si se recortan demasiadas señales. La distorsión de los filtros de ranura equivalentes individuales tiene carácter aditivo. Por consiguiente, debe ajustarse el umbral de recorte para eliminar las señales de las estaciones de base de mayor potencia y no recortar las señales de las estaciones móviles, lo que puede hacerse sin afectar la viabilidad o eficacia del sistema.

APÉNDICE 1

**Parámetros típicos del servicio móvil por satélite con satélites en órbita terrestre
baja (SMS LEO) que utilizan técnicas de espectro ensanchado
y de los sistemas móviles terrestres**

En los cuadros 1 y 2 aparecen los parámetros típicos de un sistema del SMS de espectro ensanchado. Se codifica un mensaje de entrada a una cierta velocidad binaria para producir un mensaje codificado con una cierta velocidad de símbolos. Cada símbolo se «segmenta» para producir la señal de salida de espectro ensanchado a la frecuencia de segmentos. A continuación, se filtra el espectro resultante para eliminar las emisiones fuera de banda.

CUADRO 1

Parámetros de un sistema típico del SMS LEO con espectro ensanchado totalmente

Altitud orbital, h	1 300 km	
Alcance a 5° , d	3 753 km	
Periodo orbital, T	111,6 min	
Paso por la vertical, T_p	21 min	
Velocidad binaria de los mensajes, R_b	1 400 bit/s	
Velocidad de codificación de los símbolos, R_s	2 800 bit/s	
Segmentos por símbolo, R_c	255	
Factor de caída del filtro de salida	1,4	
Probabilidad de error, P_c	10^{-5}	
E_b/N_0 necesaria, $(E_b/N_0)_r$	2,3 dB valor teórico	4,0 dB valor práctico
N.º de usuarios simultáneos, N_u	4	
N.º de códigos de control y adquisición de datos, N_c	4	
p.i.r.e. de usuario	3 dBW (enlace ascendente)	-2,3 dBW (enlace descendente)
p.i.r.e. de la estación de control y adquisición de datos CDA	8,5 dBW (enlace ascendente)	4,0 dBW (enlace descendente)

CUADRO 2

Parámetros de un sistema típico de espectro ensanchado/banda estrecha

Altitud orbital, h	1 300 km
Alcance a 5° , d	3 753 km
Periodo orbital, T	111,6 min
Paso por la vertical, T_p	21 min
Enlace de ida	
Frecuencia del enlace ascendente	149,9-150,05 MHz
Canal de ida, N_c	1
p.i.r.e. de la estación en Tierra	15 dBW
Velocidad binaria del canal, r_b	14 000 bit/s
Velocidad de codificación de símbolo, r_s	28 000 bit/s
Modulación	MDP-4 con desplazamiento
Frecuencia del enlace descendente	400,15-401 MHz
p.i.r.e. del satélite	13 dBW
Enlace de vuelta	
Frecuencia del enlace ascendente	148-149,9 MHz
Número de usuarios simultáneos, N_u	7
p.i.r.e. de usuario	5 dBW
Velocidad binaria de los mensajes, R_b	1 200 bit/s
Velocidad de codificación de símbolo, R_s	2 400 bit/s
Velocidad de «chips», R_c	1 000 000 bit/s
Modulación	MDP-4
Frecuencia del enlace descendente	137-138 MHz
p.i.r.e. del satélite	8 dBW

Los cuadros 3 y 4 son ejemplos de balance del enlace para sistemas típicos del SMS LEO de espectro ensanchado. Pueden aparecer algunas diferencias entre los parámetros de comunicación que figuran en estos cuadros y los de los cuadros 1 y 2; no obstante, los valores mostrados son típicos y representativos de los valores reales prácticos.

CUADRO 3

Balance del enlace típico para un sistema de espectro ensanchado totalmente

	Enlace de ida		Enlace de vuelta	
	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente
Net P_t (W)/canal	0,1	2,0	2,0	1,0
G_t (dBi)	16	2,0	1,0	3,0
p.i.r.e. (dBW)	6,0	5,0	3,0	3,0
Pérdidas en el espacio, L_s (dB)	147,37	146,76	147,37	146,76
Pérdidas por polarización, L_p (dB)	2	2	2	2
Pérdidas en recepción, L_r (dB)	0,5	2	0,5	2
G_r (dBi)	3,0	1,0	3,0	16
Nivel de la portadora (dBW)	-140,87	-144,76	-143,87	-131,76
T_s (dBK)	26,3	27,0	26,3	24,8
G_t/T_s (dB(K ⁻¹))	-23,3	-26	-23	-3,3
C/N_0 (dB(Hz))	61,45	56,85	58,45	72,07
R_b (bit/s)	8 334	8 334	4 167	4 167
E_b/N_0 disponible	22,24	17,64	22,25	35,87

CUADRO 4

Balance del enlace típico para un sistema de espectro ensanchado/banda estrecha

	Enlace de ida		Enlace de vuelta	
	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente
P_t (dBW)	-1	11,2	4	-14
Elevación (grados)	5	10	10	5
G_t (dBi)	16	1,9	1	3
p.i.r.e. (dBW)	15	13,1	5	-11
L_s (dB)	147,46	154,9	146,3	146,74
L_p (dB)	2	3	3	2
L_r (dB)	0,5	0,5	0,5	0,5
G_r (dBi)	3	1	1,9	16
Nivel recibido (dBW)	-131,96	-144,3	-142,9	-144,24
T (dBK)	33,47	28,61	33,47	33,6
C/N_0 (dB(Hz))	63,17	55,69	52,23	50,76
$C/N_{usuarios}$ (dB(Hz))			50,46	
r_b (bit/s)	14 000	14 000	1 200	1 200
E_b/N_0 (dB)	21,7	14,23	21,4	19,97
$(E_b/N_0)_t$ (dB)		13,51		15,5
Margen (dB)		9,11		11,1

APÉNDICE 2

Ejemplo de cálculo para demostrar la aplicación de algunos métodos de compartición**1. Ejemplo de análisis de interferencia producida por un sistema del SMS LEO de espectro ensanchado a un sistema móvil terrestre**

Utilizando los parámetros indicados en el apéndice 1 y empleando las ecuaciones que figuran en el anexo 1 pueden calcularse las distancias de separación para diversas situaciones.

1.1 Análisis de la interferencia producida por los terminales de usuarios del SMS a receptores móviles terrestres

En el caso de un receptor del servicio móvil terrestre sometido a interferencia procedente de un terminal de usuario del SMS, se introducen 2 W como valor de la potencia en la ecuación antes mencionada para obtener una distancia de separación de 8 km. Las estaciones móviles terrestres pueden estar sometidas a ráfagas breves de energía de radiofrecuencia procedentes de los terminales de usuario con espectro ensanchado situados en un radio de 8 km. Suponiendo una distribución uniforme de un millón de usuarios en la huella utilizable (5° de elevación) del satélite en órbita baja, únicamente 6 de dichos usuarios se encontrarían en la región local de la estación sometida a interferencia. Si esos 6 terminales transmitiesen una vez al día y cada transmisión se recibiese con un nivel superior a la sensibilidad del receptor, podría producirse una situación de interferencia menos del 0,0007% del tiempo. Como la ráfaga de 100 ms procedente de una estación del SMS de espectro ensanchado es probablemente demasiado breve para activar el silenciador, no aparecería interferencia en ningún receptor inactivo. En un receptor activo, cuyo silenciador ya está abierto por una señal deseada, podría advertirse la aparición de una ráfaga de 100 ms, pero no se consideraría perjudicial para el tráfico radiotelefónico.

Se ha sugerido como límite superior para una distribución no uniforme de terminales de usuario de espectro ensanchado en las proximidades de las estaciones móviles, el de 50 veces el valor uniforme indicado anteriormente. La posibilidad de interferencia existe durante menos del 0,04% del tiempo.

En esas circunstancias, es posible la compartición entre los terminales de usuario del SMS LEO y los receptores móviles terrestres, teniendo en cuenta la distancia de separación recomendada anteriormente. Dentro de dicha distancia de separación cabe esperar que el funcionamiento del receptor móvil terrestre se vea sólo mínimamente afectado debido a la naturaleza de la ráfaga breve y al bajo coeficiente de utilización de las transmisiones del SMS.

1.2 Análisis de la interferencia producida por las estaciones de control y adquisición de datos del SMS a los receptores del servicio móvil terrestre

Para las estaciones de control y adquisición de datos (CDA) en órbita baja y espectro ensanchado, utilizando un valor de 8,5 dBW para la p.i.r.e. del SMS en la fórmula que aparece en el § 2.1 del anexo 1 se obtiene una distancia de separación de unos 11 km que protegerá otros servicios contra las transmisiones de las estaciones CDA.

Es posible la compartición entre las estaciones CDA del SMS LEO y los receptores móviles terrestres siempre que se tenga en cuenta la distancia de separación recomendada anteriormente. A causa de la naturaleza directiva de la antena orientable de la estación CDA, un receptor móvil resultará mínimamente afectado por la interferencia perjudicial para la mayoría de los ángulos de elevación de dicha antena, aun cuando se encuentre dentro de la distancia de separación.

2. Ejemplo de cálculo del ruido total producido por el servicio móvil terrestre a un sistema del SMS LEO de espectro ensanchado

Los sistemas típicos del SMS LEO de espectro ensanchado con los parámetros globales indicados en el apéndice 1 utilizan para el enlace Tierra-espacio 1 MHz en una banda de frecuencias de 1,9 MHz (148-149,9 MHz). Del total de 3 700 usuarios móviles terrestres censados en Estados Unidos de América es razonable suponer que aproximadamente el 50% están en servicio en un instante determinado. Suponiendo una distribución uniforme de los usuarios a lo largo de la banda y un factor de actividad vocal del 33%, cabe esperar que, aproximadamente, haya 321 usuarios utilizando simultáneamente este servicio en un instante determinado dentro de los Estados Unidos de América.

El sistema móvil terrestre, cuenta normalmente con una estación de base y un cierto número de estaciones móviles. Las estaciones de base tienen hasta 100 W de potencia. Los terminales móviles normalmente funcionan con potencias entre 5 y 10 W. Como las estaciones de base y las estaciones móviles transmiten de forma alternativa, puede suponerse que la potencia media de tales transmisiones es de unos 30 W.

Utilizando el método descrito en el § 2.2.1 del anexo 1, puede calcularse el efecto de estos transmisores móviles terrestres sobre los sistemas típicos del SMS LEO de espectro ensanchado. En los cuadros 5, 6, 7 y 8 aparece un resumen de los resultados de los cálculos.

Puede ser interesante observar que cuando los valores del apéndice 1 se sustituyen en la integral para calcular P_{TOT} , el resultado es

$$P_{TOT} = 2,18 N_i A$$

o

$$\begin{aligned} \text{Ruido/Hz} &= 10 \log (2,18 N_i) - A(\text{dB}) - 10 \log (\text{anchura de banda}) - 3 \text{ dB pérdida por polarización} \\ &= 10 \log (2,18 N_i) - 201 \end{aligned}$$

El cuadro 5 muestra la potencia inducida por los sistemas móviles terrestres para distintos valores de tráfico de interferencia. En el ejemplo de cálculo del balance del enlace se utilizarán los valores de este cuadro. En los cuadros 6 y 7 aparece el margen de funcionamiento para un nivel determinado de tráfico en Erlangs y un valor específico del ángulo de elevación usuario-satélite. Calculando este cuadro del balance de enlace para distintas suposiciones de tráfico y ajustando el ángulo de elevación para obtener un margen de funcionamiento no negativo, puede elaborarse el cuadro 8 que demuestra la degradación moderada que experimenta un sistema de espectro ensanchado cuando aumenta la interferencia. No obstante, cabe señalar que este comportamiento depende en gran medida del diagrama de radiación de la antena del satélite.

3. Medición experimental del ruido total producido por los servicios móviles terrestres a un sistema del SMS LEO de espectro ensanchado

En agosto de 1992 se lanzó el satélite experimental francés S80/T a una órbita próxima a la adecuada para un sistema del SMS LEO (altura de 1 300 km). La señales recibidas por el satélite en la banda 148,0-149,9 MHz se retransmitieron en la banda 137,0-138,0 MHz. Los experimentos llevados a cabo con señales de espectro ensanchado corroboraron los análisis realizados de balance del enlace.

CUADRO 5

Ejemplo de cálculo de la potencia inducida por sistemas móviles terrestres

Factor vocal = 0,3

$N_e = 321$

Tráfico (E)	N_i a 1% (2,3 σ)	P_{TOT} (dB(W/Hz))	Densidad portadora/ruido	
			De ida	De vuelta
0,05	22	-184,3	47,93	42,41
0,09	40	-181,7	45,34	39,82
0,13	57	-180,2	43,79	38,28
0,18	74	-179,1	42,69	37,17
0,23	90	-178,2	41,83	36,31
0,27	106	-177,5	41,13	35,61
0,32	121	-176,9	40,54	35,03
0,36	136	-176,4	40,04	34,53
0,4	150	-176,0	39,62	34,10

CUADRO 6

Ejemplo de balance del enlace mostrando el margen de funcionamiento para un tráfico de interferencia y un ángulo de elevación usuario-terminal especificados

Usuario simultáneos 4
 Canales de ida 4
 Anchura de banda en radiofrecuencia (kHz) 1 000
 Tráfico internacional (E) 0,05
 Ángulo de elevación (grados) 12

	De ida		De vuelta	
	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente
P_t (W)	0,11	1,26	1,58	0,30
G_t (dBi)	18,00	2,50	1,00	0,30
p.i.r.e.	8,50	3,50	2,99	-2,30
L_s (dB) (a 12°)	145,87	145,18	145,87	145,18
L_p (dB)	2,00	2,00	2,00	2,00
L_r (dB)	0,50	1,00	0,50	1,00
G_r (dB)	3,50	2,00	3,50	19,00
Portadora (dBW)	-136,37	-142,67	-141,89	-131,48
T_s (K)	450,00	500,00	450,00	475,00
G_r/T_s (dB(K ⁻¹))	-23,03	-24,99	-23,03	-7,77
C/N_0 (dB(Hz))	65,69	58,94	60,18	70,35
R_b (bit/s)	8 334	8 334	4 167	4 167
E_b/N_0 (dB)	26,48	19,73	23,98	34,16
C/N_0	65,69	58,94	60,18	70,35
Densidad C/N de usuarios	59,49	59,78	55,23	55,23
Densidad C/N de canales	55,23	55,23	48,47	48,17
Densidad C/N de interferencia	47,93	100,00	42,41	100,00
U y D compuesto	46,88	52,73	41,22	47,37
De ida y vuelta	45,88		40,27	
E_b/N_0 necesaria	4,0		4,0	
Densidad C/N necesaria	43,21		40,20	
Margen	2,67		0,08	

CUADRO 7

Balance de enlace mostrando el margen de funcionamiento para un tráfico de interferencia especificado en un sistema típico de espectro ensanchado/banda estrecha

	De ida		De vuelta		Interferencia
	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente	Descendente
P_t (dBW)	-1	11,2	4	-14	
Elevación (grados)	5	10	10	5	
G_r (dBi)	16	1,9	1	3	
p.i.r.e. (dBW)	15	13,1	5	-11	
L_s (dB)	147,46	154,9	146,3	146,74	
L_p (dB)	2	3	3	2	
L_r (dB)	0,5	0,5	0,5	0,5	
G_r (dBi)	3	1	1,9	16	
Nivel recibido (dBW)	-131,96	-144,3	-142,9	-144,24	-124 ⁽¹⁾
T (dBK)	33,47	28,61	33,47	33,6	
C/N_0 (dB(Hz))	63,17	55,69	52,23	50,76	
$C/N_{usuarios}$ (dB(Hz))			50,46		
$C/N_{interferencia}$ (dB(Hz))					41,1
r_b (bit/s)	14 000	14 000	1 200	1 200	
E_b/N_0 (dB)	21,7	14,23	21,4	19,97	
$(E_b/N_0)_t$ (dB) con interferencia	13,51		9,17		
Margen con interferencia (dB)	9,11		4,77		

(1) Si se recibe una señal de interferencia total más elevada, se lleva a cabo a bordo un filtrado de banda estrecha.

CUADRO 8

Resultado del análisis del balance del enlace para diversos niveles de interferencia

Tráfico (E)	Mínimo ángulo de elevación (grados)	Zona de servicio (miles de km ²)
0,0	0	32 345
0,05	12	21 456
0,09	25	10 094
0,13	35	5 694
0,18	43	3 570
0,23	51	2 175
0,27	60	1 159
0,32	70	475
0,36	90	0