

RECOMENDACIÓN UIT-R SM.1046

DEFINICIÓN DE LA EFICACIA EN LA UTILIZACIÓN DEL ESPECTRO POR UN SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES

(Cuestión UIT-R 47/1)

(1994)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que el espectro es un recurso natural limitado de gran valor económico y social;
- b) que la demanda de utilización del espectro está creciendo rápidamente;
- c) que existen diversos factores, tales como utilización de distintas bandas de frecuencias para determinados servicios de radiocomunicaciones, métodos de gestión del espectro pertinentes para las redes de dichos servicios, características técnicas de los transmisores, receptores y antenas empleados en los servicios, etc., que influyen de forma notable en la utilización eficaz del espectro y la optimización de dichos factores, especialmente mediante tecnologías nuevas o mejoradas, puede traducirse en importantes economías de espectro;
- d) que es necesario definir el grado y la eficacia de utilización del espectro como método de comparación y análisis para evaluar las ventajas obtenidas con el empleo de tecnologías nuevas o mejoradas, especialmente por las administraciones en la planificación nacional a largo plazo de la utilización del espectro y el desarrollo de las radiocomunicaciones;
- e) que la comparación de la utilización eficaz del espectro entre sistemas de radiocomunicaciones reales sería muy útil a la hora de desarrollar tecnologías nuevas o mejoradas y de evaluar el comportamiento de los sistemas existentes,

recomienda

1. que, como concepto básico, se utilice el dominio combinado anchura de banda-espacio-tiempo como medida de la utilización del espectro, el «factor de utilización del espectro», como se indica en el anexo 1 para los equipos radioeléctricos de transmisión y recepción;
2. que, como concepto básico, se mida la eficacia de utilización del espectro, o la eficacia espectral de manera más breve, como la relación entre el volumen de información transferida a una distancia (o comunicaciones establecidas) y el factor de utilización del espectro, como se indica en el anexo 1. En el anexo 2 aparecen algunos ejemplos de utilización de este concepto;
3. que, para comparar las eficacias espectrales entre diversos sistemas de radiocomunicaciones, se utilice el concepto básico de eficacia relativa del espectro como se indica en el anexo 1;
4. que las comparaciones entre las eficacias espectrales se lleven a cabo únicamente entre tipos similares de sistemas radioeléctricos que proporcionan servicios de radiocomunicaciones idénticos, como se indica en el § 4 del anexo 1;
5. que para determinar la eficacia de utilización del espectro se consideren las interacciones de diversos sistemas y redes de radiocomunicaciones dentro de un entorno electromagnético particular.

ANEXO 1

Criterios generales para evaluar el factor de utilización del espectro y grado de eficacia de utilización**1. Factor de utilización del espectro**

La utilización eficaz del espectro se logra (entre otros métodos) mediante el aislamiento obtenido gracias a la directividad de la antena, la separación geográfica, la compartición de frecuencias o la utilización de frecuencias ortogonales y la compartición en el tiempo o división en el tiempo, reflejándose estas consideraciones en la definición de

utilización del espectro. Por consiguiente, la medida de utilización del espectro, factor de utilización del espectro (U), se define como el producto de la anchura de banda en frecuencia por el espacio geométrico (geográfico) y por el tiempo denegado a otros usuarios potenciales:

$$U = B \cdot S \cdot T \quad (1)$$

siendo:

B : la anchura de banda radiofrecuencia

S : espacio geométrico (normalmente una superficie)

T : tiempo.

El espacio geométrico de interés también puede ser un volumen, una línea (por ejemplo, la órbita de los satélites geoestacionarios) o un sector angular alrededor de un punto. La cantidad de espacio denegada depende de la densidad espectral de potencia. En muchas aplicaciones, la dimensión del tiempo puede ignorarse puesto que el servicio funciona de manera continua. Pero en algunos servicios, por ejemplo, radiodifusión y servicio móvil por un solo canal, es importante compartir el factor tiempo y los tres factores deben considerarse de forma simultánea y optimizarse.

La medida del espectro puede calcularse multiplicando la anchura de banda que limita la emisión (por ejemplo, la anchura de banda ocupada) por su zona de interferencia, o puede tener en cuenta la forma real de la densidad espectral de potencia de la emisión y las características de radiación de la antena.

Tradicionalmente, se han considerado a los transmisores radioeléctricos como los usuarios del recurso espectro. Utilizan el espectro-espacio llenando parte del mismo con potencia radioeléctrica; tanta potencia, en algunos casos, que los receptores de otros sistemas no pueden funcionar en ciertas ubicaciones, horas y frecuencias debido a la aparición de interferencia inaceptable. Cabe señalar que los transmisores niegan el espacio únicamente a los receptores. El simple hecho de que en el espacio haya potencia no impide en modo alguno a otro transmisor emitir potencia en la misma ubicación; es decir, un transmisor no impide el funcionamiento de otro transmisor.

Los receptores utilizan el espectro-espacio porque lo niegan a los transmisores. El simple funcionamiento físico del receptor no provoca ninguna interferencia (salvo si actúa de forma inopinada como transmisor o fuente de potencia). Aún en ese caso, el espacio utilizado físicamente es relativamente pequeño. Sin embargo, las autoridades niegan licencias de explotación a los transmisores a fin de garantizar la recepción libre de interferencias. La protección puede ser en espacio (distancia de separación, distancia de coordinación), en frecuencia (bandas de guarda) o incluso en tiempo (en Estados Unidos de América, algunas estaciones de radiodifusión en ondas hectométricas tienen limitado su funcionamiento en horas diurnas). Esta denegación constituye la "utilización" del espacio por parte del receptor. Las bandas de radioastronomía son un ejemplo típico de reconocimiento de utilización del espacio espectral por el receptor.

Una forma de incorporar estas circunstancias a una unidad de medida del espectro-espacio es dividir el recurso en dos espacios, el espacio del transmisor y el espacio del receptor, y definir unidades duales para medir la utilización de cada uno de ellos. Cuando la sencillez sea el factor más importante, ambas unidades pueden recombinarse en una sola medida para utilización del sistema.

En el capítulo 6 del Manual sobre Gestión nacional del espectro aparece más información relativa al método general de cálculo del factor de utilización del espectro.

2. Eficacia de utilización del espectro

De acuerdo con su definición, la eficacia de utilización del espectro (EUE) de un sistema de radiocomunicaciones puede expresarse por la fórmula siguiente:

$$EUE = \frac{M}{U} = \frac{M}{B \cdot S \cdot T} \quad (2)$$

siendo:

M : cantidad de información transferida a una cierta distancia.

3. Eficacia relativa de utilización del espectro

El concepto de eficacia relativa de utilización del espectro (ERE) puede utilizarse para comparar las eficacias espectrales de dos tipos similares de sistemas de radiocomunicaciones que proporcionen el mismo servicio.

Esta eficacia relativa se define como la relación entre dos eficacias espectrales, una de las cuales puede ser la eficacia de un sistema utilizado como patrón de comparación. Es decir,

$$ERE = EUE_r / EUE_p \quad (3)$$

siendo:

ERE: eficacia relativa del espectro, es decir la relación entre las EUE

EUE_p: eficacia de utilización del espectro (EUE) de un sistema «patrón»

EUE_r: eficacia de utilización del espectro (EUE) de un sistema real.

Los candidatos más adecuados para un sistema patrón son los siguientes:

- el sistema más eficaz teóricamente,
- un sistema que puede ser definido y comprendido fácilmente,
- un sistema ampliamente utilizado que constituya, de hecho, un patrón en la industria.

La ERE será un número positivo con valores entre cero e infinito. Si el sistema patrón elegido es el sistema más eficaz teóricamente, la ERE variará normalmente entre cero y uno.

Como ejemplo, el sistema teóricamente más eficaz puede caracterizarse de acuerdo con los principios de la teoría de la información. La capacidad de comunicación de un canal de comunicaciones a través del cual un abonado o un oyente recibe la comunicación deseada viene determinada por la relación:

$$C_0 = F_0 \ln(1 + \rho_0)$$

siendo:

F₀: anchura de banda de la comunicación deseada

ρ₀: relación señal ruido a la salida del receptor.

Si esta relación señal/ruido a la entrada del receptor es igual a la relación de protección *ρ_s* y la anchura de banda del canal de comunicaciones por el que se transmiten las señales es igual a *F_m*, la capacidad de comunicación es *C_p = F_m ln(1 + ρ_s)*. Este último valor debe ser mayor o igual a la capacidad de comunicación del canal por el que el abonado recibe la comunicación deseada, es decir *C_p ≥ C₀*. Por consiguiente, el mínimo valor posible de la relación de protección *ρ_s* a la que el abonado recibirá una comunicación con una relación señal/ruido igual a *ρ₀* se define como:

$$\rho_s = (1 + \rho_0)^{F_0/F_m} - 1 \quad (4)$$

La ventaja principal de calcular directamente la ERE consiste en que a menudo es mucho más fácil de calcular que las EUE. Como los sistemas proporcionan el mismo servicio, normalmente tendrán muchos factores en común (a veces, incluso componentes físicos). Ello significa que muchos factores se «cancelarán» en el cálculo antes de que deban calcularse realmente. A menudo, este hecho reduce en gran medida la complejidad de los cálculos.

En el capítulo 6 del Manual sobre Gestión nacional del espectro figuran algunos ejemplos de cálculos de la ERE.

4. Comparación de las eficacias de utilización del espectro

Como se ha descrito en los puntos anteriores, los valores de la EUE pueden calcularse para diversos sistemas y, a continuación, compararse para obtener las eficacias relativas de dichos sistemas. Sin embargo, esas comparaciones deben realizarse con precaución. Por ejemplo, las EUE calculadas para un sistema de radiocomunicaciones móviles terrestres y un sistema de radar son muy distintas. La velocidad de transferencia de información, los receptores y los transmisores de estos dos sistemas son tan diferentes que ambas EUE no son comparables y, por consiguiente, no sería especialmente útil hacerlo. En consecuencia, la comparación de la eficacia de utilización del espectro debe realizarse únicamente entre sistemas similares y que proporcionan servicios de radiocomunicaciones idénticos. Sería conveniente efectuar la comparación de la eficacia o utilización del espectro del mismo sistema a lo largo del tiempo para observar si se produce alguna mejora en la zona específica estudiada.

Cabe señalar igualmente que aunque la eficacia de utilización del espectro es un factor importante, porque permite obtener la máxima cantidad de servicios a partir del espectro radioeléctrico, no es el único factor que debe considerarse. Entre otros factores que deben incluirse en la elección de una tecnología o de un sistema cabe citar los costes, la disponibilidad de equipos, la compatibilidad con equipos y técnicas existentes, la fiabilidad del sistema y las características de explotación.

ANEXO 2

Ejemplos

1. Utilización eficaz del espectro en un sistema radioeléctrico picocelular de interior

En el caso de un sistema picocelular de interior en la banda de frecuencias entre 900 MHz y 60 GHz, la eficacia de utilización del espectro puede obtenerse igualmente mediante la ecuación (2). A partir de esta ecuación, la eficacia de utilización del espectro de un sistema radioeléctrico picocelular de interior puede definirse como:

$$\text{Erlangs} / (\text{anchura de banda} \times \text{superficie}) \quad (5)$$

siendo Erlangs, el tráfico vocal total cursado por el sistema picocelular, anchura de banda, la cantidad total de espectro utilizado por el sistema y superficie, el área total de servicio cubierta por el sistema. Como los sistemas picocelulares se implantan en edificios de gran altura, para calcular la eficacia del espectro se utiliza la superficie total de los pisos. Puede entonces determinarse el número de canales necesarios por célula basándose en las tablas de Erlang *B* para un número determinado de usuarios en cada piso y un volumen de tráfico concreto por usuario.

1.1 Sistema picocelular que cubre un edificio

Para calcular la anchura de banda total necesaria para todo el edificio, se necesita conocer la distancia de reutilización vertical en término del número de pisos. Este parámetro depende de las pérdidas en los pisos y es distinto para diferentes tipos de edificios.

Puede entonces calcularse el número total de canales semidúplex necesarios para el edificio que es igual a:

$$2 \times \text{N.º de canales por célula} \times \text{N.º de células por piso} \times \text{N.º de pisos de separación}$$

Es preciso incluir el factor 2 para reflejar el número de canales necesarios en las comunicaciones bidireccionales.

La utilización eficaz del espectro, EUE_{edificio} , del sistema que proporciona cobertura en el edificio puede calcularse mediante la ecuación (5):

$$EUE_{\text{edificio}} = \frac{\text{Tráfico total cursado en todo el edificio}}{\text{N.º total de canales} \times \text{anchura de banda del canal} \times \text{superficie total de los pisos}} \quad (6)$$

Ejemplo:

Sistema de interior que funciona a 900 MHz

Anchura de banda de un canal (semidúplex)	25 kHz
N.º de canales por célula	10
N.º de células por piso	4
N.º de pisos de separación	3
N.º total de canales necesarios	120

Para un grado de servicio del 0,5%, el tráfico cursado en un piso = $T_f = 16 E$ ó $2 T_f$ debido a las estaciones base y móvil.

$$EUE_{\text{edificio}} = \frac{16 \times \text{N.º de pisos}}{120 \times 0,025 \times \text{superficie total de los pisos}} \quad (7)$$

Si cada piso tiene 25×55 m, $EUE_{\text{edificio}} = 3880 E/\text{MHz}/\text{km}^2$

1.2 Sistema picocelular que cubre un centro urbano

De forma similar, la anchura de banda necesaria para cubrir toda la superficie de un centro urbano puede calcularse también si se conoce la distancia de reutilización horizontal. También en este caso, dicho parámetro depende del material de los edificios y de las pérdidas de propagación de la señal en el interior y exterior de los mismos. Esta distancia de reutilización afecta directamente al número de edificios que pueden situarse en una agrupación (o grupo de interferencia).

En este caso, el número total de canales semidúplex necesarios en todo el centro urbano a cubrir es igual a:

$$2 \times \text{N.º de canales por edificio} \times \text{N.º de edificios por agrupación}$$

También en este caso se incluye el factor 2 a fin de reflejar el número de canales precisos para comunicaciones bidireccionales.

La eficacia de utilización del espectro, $EUE_{\text{superficie}}$, del sistema que proporciona cobertura a todo el centro urbano puede calcularse mediante la ecuación (5):

$$EUE_{\text{centro urbano}} = \frac{\text{Tráfico total cursado en toda la zona}}{\text{N.º total de canales} \times \text{anchura de banda del canal} \times \text{zona total de servicio}} \quad (8)$$

En este caso, la zona total de servicio es la superficie total de los pisos de los edificios cubiertos por el sistema picocelular.

Ejemplo:

Sistema de interior que funciona a 900 MHz

Número de canales por edificio`	120
N.º de edificios por agrupación	4
Anchura de banda de un canal (semidúplex)	25 kHz
N.º total de canales necesarios	480

$$EUE_{\text{centro urbano}} = \frac{16 \times \text{N.º de pisos} \times \text{N.º de edificios}}{120 \times 4 \times 0,025 \times \text{superficie total de los pisos}} = 970 \text{ E / MHz / km}^2 \quad (9)$$

Nota 1 – Puede encontrarse información adicional en:

CHAN, G. y HACHEM, H. [septiembre de 1991] Spectrum Efficiency of a Pico-Cell System in an Indoor Environment. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Quebec City, Canadá.

HATFIELD, D.N. [agosto de 1977] Measures of Spectral Efficiency in Land Mobile Radio. *IEEE Trans. of Electromag. Compt.* Vol. EMC-19, 3, 266-268.

2. Eficacia de utilización del espectro en un sistema terrenal de relevadores radioeléctricos entre puntos fijos

2.1 Introducción

Para los sistemas de relevadores radioeléctricos que funcionan de modo permanente, puede despreciarse la dimensión temporal. Refiriéndose a la ecuación (2), la eficacia de utilización del espectro, puede escribirse así:

$$EUE = \frac{C}{B \cdot S_{\alpha}} \quad (10)$$

donde:

C : medida de la capacidad de comunicaciones, por ejemplo canales telefónicos o bit/s

S_{α} : parámetro geométrico, por ejemplo una superficie o el ángulo entre los enlaces que parten de un nodo.

2.2 Eficacia de utilización del espectro para una arteria larga con enlaces derivados en los nodos

La capacidad de comunicaciones normalizada, que da la eficacia de utilización del espectro (EUE) para un sistema terrenal de relevadores radioeléctricos entre puntos fijos se define como:

$$EUE = \frac{N \cdot A}{B_c} \quad (11)$$

donde:

N : número admisible de derivaciones (es decir, arterias radioeléctricas bilaterales) en una estación repetidora

A : capacidad de transmisión (por ejemplo, número de canales telefónicos) por radiocanal

B_c : anchura de banda de radiofrecuencia necesaria por radiocanal.

Esta fórmula incluye la medida geométrica N (N depende del ángulo admisible entre los enlaces derivados).

Usando la fórmula anterior se calculó la eficacia de utilización del espectro para la transmisión de telefonía por un sistema terrenal de relevadores radioeléctricos entre puntos fijos.

Se adoptan las siguientes hipótesis:

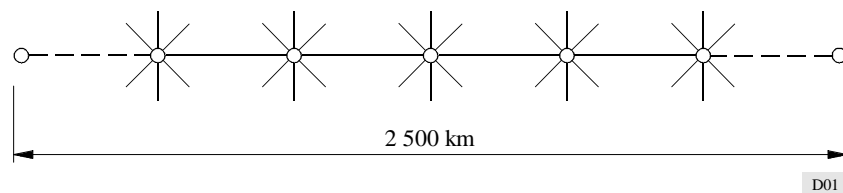
- se transmiten señales telefónicas;
- la probabilidad de desvanecimiento es la indicada en la Recomendación UIT-R PN.530;
- la longitud del circuito es de 2 500 km, y el modelo de circuito es el que se muestra en la fig.1;
- la C/N requerida se expresa como:

$$C/N = 10 \log [(2^n - 1) / 3] + 11,8 \quad \text{dB} \quad (12)$$

donde n es el número de estados de la modulación de amplitud en cuadratura (MAC);

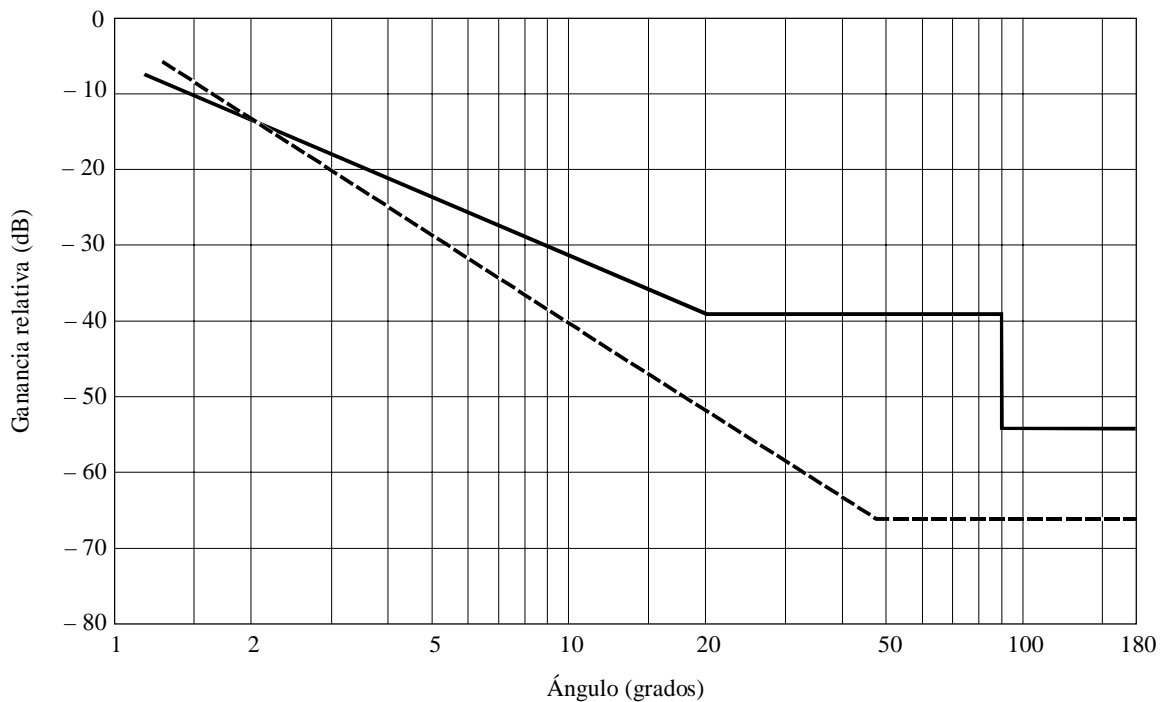
- una décima parte del ruido global del circuito de relevadores radioeléctricos, de 2 500 km de longitud, se asigna al ruido debido a la interferencia procedente de otras arterias;
- la interferencia debida a otras arterias tiene la misma frecuencia de la señal deseada;
- se utilizó un diagrama de referencia de antena para una antena circular tal como el que figura en la Recomendación UIT-R F.699, y una doble antena descentrada de triple reflector, empleada en Japón para radioenlaces digitales, como consta en la fig. 2;
- enlaces con circuitos en derivación de ángulos aleatorios.

FIGURA 1
Modelo de circuito



Se calcularon las capacidades normalizadas de comunicación para estos dos tipos de antena y los resultados se indican en la fig. 3. La calidad de funcionamiento de la antena circular de la Recomendación UIT-R F.699 no es suficiente como para estimar la eficacia de la utilización del espectro con sistemas de modulación de un número elevado de estados. Los resultados dependen de las características de funcionamiento de la antena. Si se pudiera emplear una antena de alta calidad, resultaría eficaz una modulación de amplitud en cuadratura de muchos estados, tal como MAC-256.

FIGURA 2
Diagrama de antena



— Diagrama de referencia preliminar del UIT-R
 - - - Diagrama de antena de triple reflector descentrado

D02

3. Eficacia de utilización del espectro en enlaces de relevadores radioeléctricos dispuestos arbitrariamente

3.1 Formulación

La fig. 4 representa un enlace de relevadores radioeléctricos X-Y con otra estación radioeléctrica Z que funciona en la misma frecuencia. La estación Z está situada al azar dentro de un círculo que rodea a la estación Y.

La estación Y recibe en la frecuencia f_1 una señal deseada de la estación X. La estación Z transmite una señal de la misma frecuencia f_1 en una dirección arbitraria.

La capacidad de comunicación normalizada, que da la eficacia de utilización del espectro, se define como sigue:

$$EUE = \frac{N \cdot A}{B_c} = \frac{\bar{p}}{p} \frac{A}{B_c} \quad (13)$$

donde:

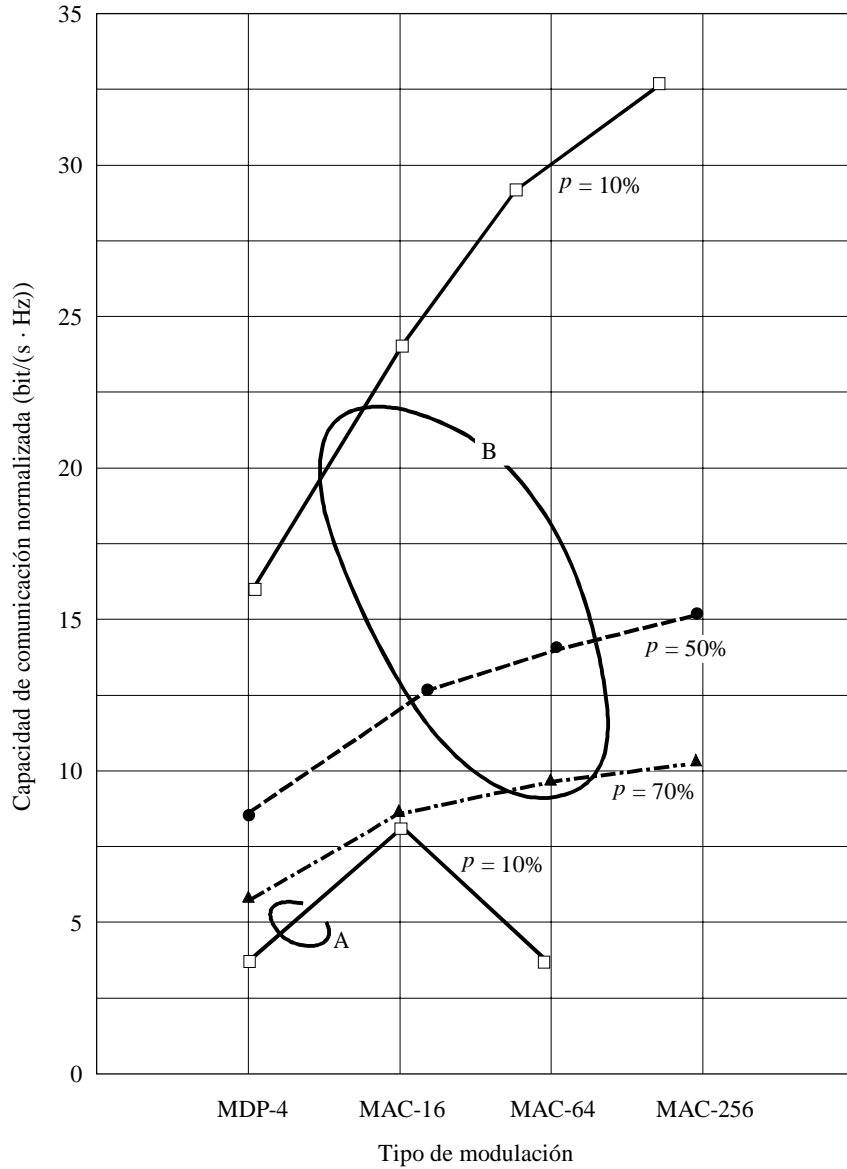
N : número de enlaces radioeléctricos posibles que utilizan la misma frecuencia: $N \approx \bar{p}/p$

A : capacidad de transmisión por radiocanal.

La probabilidad p de que la estación Y reciba una interferencia que rebase el límite admisible, se calcula considerando la combinación del diagrama de antena de las estaciones Y y Z: \bar{p} es la probabilidad máxima admisible de interferencia.

Como se ha despreciado la acumulación de interferencia procedente de dos o más estaciones, en las aplicaciones reales hay que prever un cierto margen.

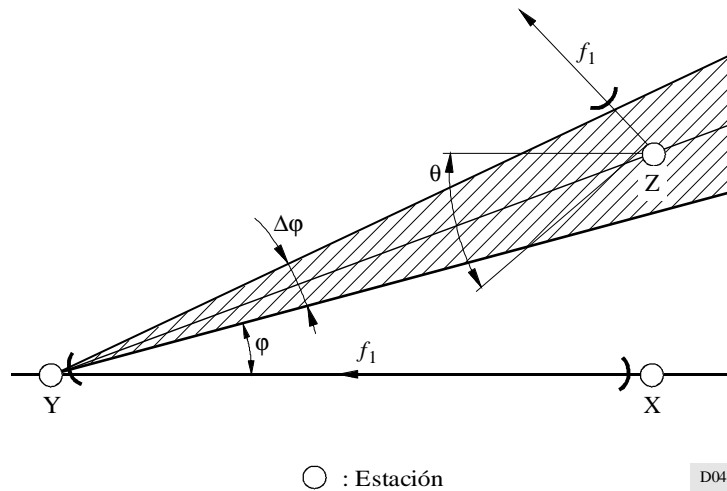
FIGURA 3
Capacidad de comunicación normalizada



Margen de desvanecimiento: 20 dB
 Separación entre repetidores: 50 km
 Capacidad del canal: 64 kbit/s
 Atribución de ruido a la derivación: 10%

p : Probabilidad de interferencia
 A: Diagrama preliminar de referencia del UIT-R
 B: Diagrama de antena de reflector triple descentrado

FIGURA 4
Disposición arbitraria de estaciones



3.2 Aplicación: eficacia de utilización del espectro en los sistemas de relevadores radioeléctricos en la banda de 2 GHz

Con la fórmula anterior, se calculó la eficacia de utilización del espectro en un sistema de relevadores radioeléctricos terrenales punto a punto de pequeña capacidad, que funciona en la banda de 2 GHz.

Se calculó la eficacia relativa de utilización del espectro, para antenas de 1,8 m de diámetro teniendo en cuenta la relación entre interferencia admisible y la eficacia propia para cada tipo de modulación indicada en el cuadro 1. Los resultados se recogen en la fig. 5.

Para los márgenes inferiores de desvanecimiento, el sistema digital es superior al sistema analógico. En este estudio, la atenuación debida al desvanecimiento es la misma que la degradación D/U (relación entre los niveles de la señal deseada y no deseada) producida por la interferencia. Si se utilizan técnicas de diversidad de espacio, el margen necesario de desvanecimiento es más reducido. En general, los sistemas digitales tienden a proporcionar una mejor eficacia de utilización del espectro.

En el caso de los sistemas de modulación digital, el paso de la modulación de dos fases a la multifase o multiestado requiere menor anchura de banda pero puede implicar una reducción de la eficacia de utilización del espectro cuando la interferencia es grande. El valor detallado depende de las características de la antena, etc., pero el sistema MDP de 4 estados puede ser óptimo desde el punto de vista macroscópico, en aquellos casos en que otros sistemas de relevadores radioeléctricos están funcionando alrededor de la estación de repetidores y están situados aleatoriamente en dicha zona.

3.3 Eficacia de utilización del espectro en una red en malla aleatoria

Con el fin de realizar una correcta comparación de los procedimientos de modulación, uno puede suponer un plan de frecuencias entrelazado con una separación entre radiocanales correspondiente a una determinada degradación de las características funcionales provocada por las interferencias de canal adyacente. El cuadro 2 recoge unos valores tentativos para la separación normalizada entre radiocanales X definida en el Informe 608 (Kyoto, 1978) del ex CCIR y la correspondiente eficacia espectral en $\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$. Aunque podrían deducirse resultados diferentes, en base a otras suposiciones, debería observarse que los resultados calculados del cuadro 2 están muy próximos de los valores que podrían deducirse para disposiciones específicas de radiocanales como las sugeridas por las Recomendaciones UIT-R (por ejemplo 140 Mbit/s con modulación MAC-16 y una separación de 40 MHz entre radiocanales con polarización cruzada). Los valores medidos pueden ser diferentes de estos valores calculados.

CUADRO 1

Parámetros de diversos tipos de modulación en la banda de 2 GHz

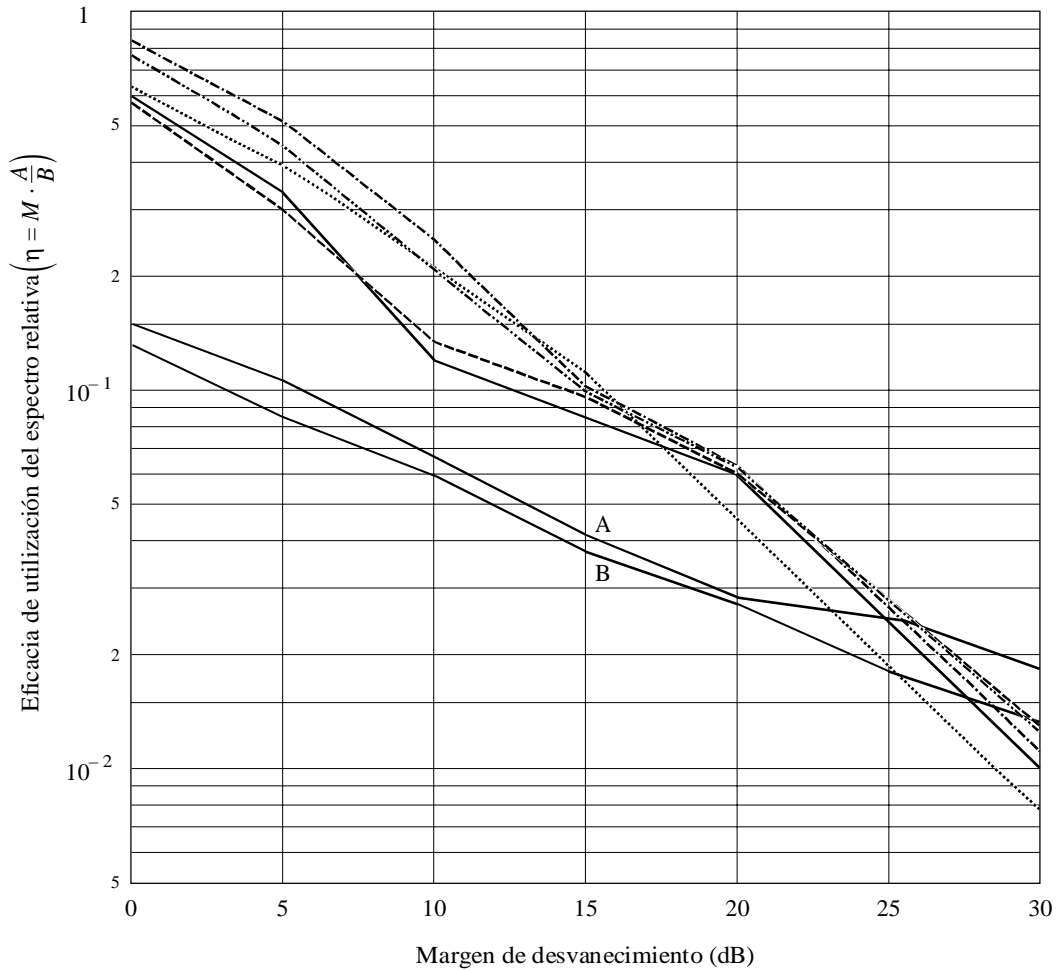
Tipo de modulación		Relación S/N admisible o proporción de errores	Factor de reducción de la interferencia		Relación admisible señal deseada/ señal no deseada D/U	Parámetros relacionados con B		Separación entre canales adyacentes B	Número de canales A	$A/B^{(1)}$ (canales/kHz)
Transmisión analógica	MF	58 dB	20 dB		38 dB	Excursión de frecuencia para el tono de prueba: 100 kHz r.m.s.		520 kHz	24	0,046
	BLU	58 dB	9,5 dB		48,5 dB	Frecuencia límite superior de la banda de base: 108 kHz Coeficientes del filtro: $\times 2$ Tolerancia de frecuencias: 20 kHz		236 kHz	24	0,1
Transmisión digital	MDP de dos niveles	10^{-6}	(C/N)	(Degradación)	16,2 dB	Frecuencia de reloj	Coeficiente del filtro	2 MHz	24	0,012
			10,7 dB	5,5 dB		1 544 kHz	$\times 1,3$			
	MDP de cuatro niveles	10^{-6}	13,7 dB	5,5 dB	19,2 dB	772 kHz	$\times 1,4$	1,1 MHz	24	0,022
	MDP de ocho niveles	10^{-6}	19,1 dB	5,5 dB	24,6 dB	515 kHz	$\times 1,5$	0,77 MHz	24	0,031
	QPRS	10^{-6}	16,8 dB	5,5 dB	22,3 dB	722 kHz	$\times 1,1$	0,85 MHz	24	0,028
MAC-16	10^{-6}	21,4 dB	5,5 dB	26,9 dB	386 kHz	$\times 1,6$	0,62 MHz	24	0,039	

⁽¹⁾ Eficacia propia de cada tipo de modulación.

Hipótesis:

- Valores de interferencia admisible y eficacia de utilización del espectro para cada tipo de modulación como los indicados en el cuadro 1. Se atribuye a la interferencia el 80% del ruido total del circuito.
- Se supone que las distancias entre la estación que experimenta la interferencia (estación Y) y las estaciones interferentes son todas iguales. Se admite que esta hipótesis produce un pequeño error en los cálculos de eficacia, ya que las pérdidas, en condiciones de espacio libre, de los dos enlaces difieren solamente en 6 dB, aún cuando sus longitudes difieran en un factor de dos.
- Se supone que los desvanecimientos de la señal deseada y de las señales interferentes no están relacionados.
- El diagrama de radiación de la antena, es el de referencia de la Recomendación UIT-R F.699.
- Todas las estaciones tienen la misma potencia de transmisión.
- El límite para la probabilidad de interferencia $\bar{p} = 0,1$.

FIGURA 5
Eficacia de utilización del espectro para una disposición aleatoria



Banda de frecuencias: 2 GHz
Capacidad: 24 canales

- MDP-4 (modulación por desplazamiento de fase de 4 estados)
- MDP-8
- MDP-2
- QPRS (modulación en cuadratura de respuesta parcial)
- MAQ-16 (modulación de amplitud en cuadratura de 16 estados)
- Curvas A: BLU (modulación de amplitud en banda lateral única)
- B: MF (modulación de frecuencia)

CUADRO 2

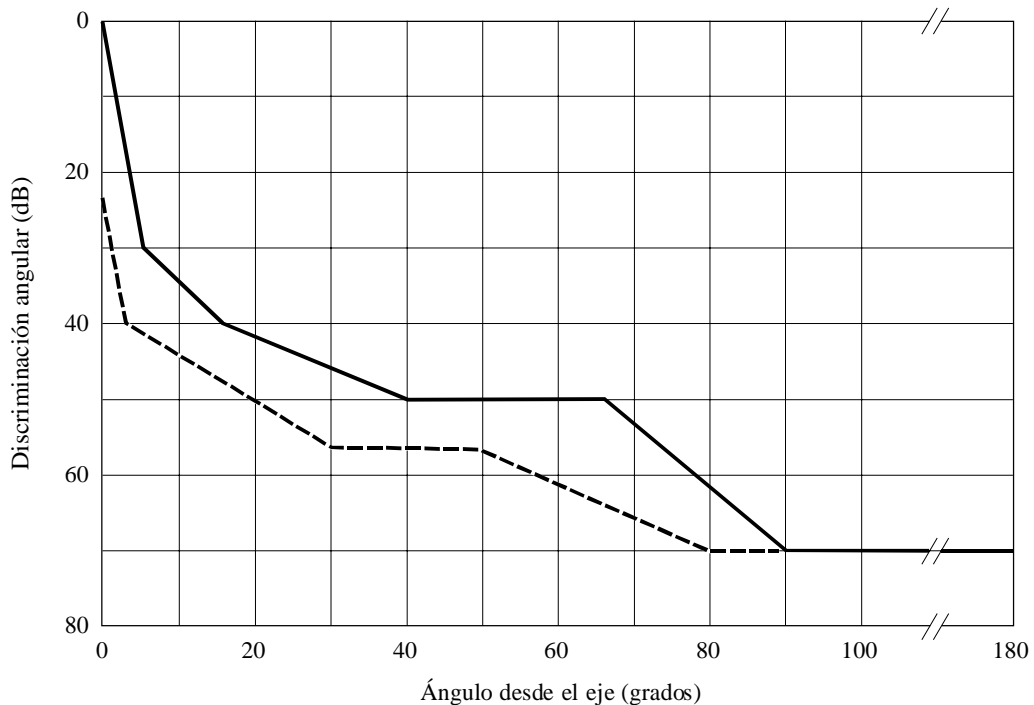
Procedimiento de modulación	Separación normalizada entre radiocanales X	Eficacia espectral (bit/(s · Hz))
MDP-4	1,88	2,13
MDP-8	2,16	2,77
MAC-16	2,23	3,59

Nota 1 – Degradación debida a la interferencia de canal adyacente: 0,5 dB.

- Filtros de canal: coseno alzado con factor de caída de 0,5.
- Aislamiento entre radiocanales con polarización cruzada (DPX residual): 12 dB.

El diagrama de radiación de antena utilizado en el análisis se muestra en la fig. 6 y corresponde a una antena parabólica típica. Se ha supuesto que la degradación de la calidad de funcionamiento (para una proporción de bits erróneos de 10^{-3}) debida a la interferencia cocanal procedente de otros enlaces, no es superior a 1 dB. Se supone que el enlace interferido se encuentra en el umbral con un margen de desvanecimiento de 40 dB en tanto que el enlace interferente recibe su valor nominal.

FIGURA 6
Diagramas de radiación de antenas



Antena parabólica, $D/\lambda = 75$

- Misma polarización
- - - Polarización ortogonal

Se ha definido una densidad normalizada de la red γ de la siguiente forma:

$$\gamma = \frac{2N \rho^2}{\text{Área total cubierta por la red}} \tag{14}$$

donde:

N : número de nudos radioeléctricos en la red

ρ : valor medio cuadrático de la longitud de los tramos.

Los resultados de la fig. 7, muestran que en las redes de alta densidad se consigue la máxima eficacia con la modulación MDP-4, mientras la comparación de modulaciones se desplaza a favor de la MDP-8 o incluso de la MAC-16 cuando la densidad de la red es inferior. Esto demuestra que la eficacia de utilización del espectro por los métodos de modulación depende del entorno de interferencia.

FIGURA 7
Eficacia espectral en una red en malla

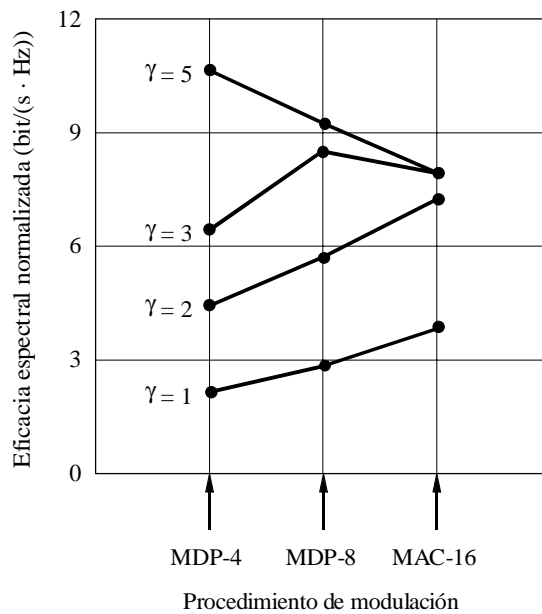


Diagrama de radiación de la fig. 6.
Degradación de la calidad debida a la reutilización de frecuencias: 1 dB

D07

Nota 1 – Puede encontrarse información adicional en:

DODO, J., KUREMATSU, H. y NAKAZAWA, I. [8-12 de junio de 1980] Spectrum use efficiency and small capacity digital radio-relay system in the 2 GHz band. IEEE International Conference on Communications (ICC '80), Seattle, WA, Estados Unidos de América.

TILLOTSON, L.C. y otros [1973] Efficient use of the radio spectrum and bandwidth expansion. *Proc. IEEE*, 61, 4.