

RECOMENDACIÓN UIT-R S.1061*

**Utilización de estrategias y técnicas contra el desvanecimiento
en el servicio fijo por satélite**

(1994)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que la presión a la que está sometido el limitado espectro de radiofrecuencia a causa de la creciente demanda de servicios por satélite está conduciendo a la utilización de bandas de frecuencias más altas;
- b) que uno de los inconvenientes principales de los sistemas de satélite en frecuencias más altas es la gran atenuación de la señal causada por la lluvia;
- c) que puede ser difícil lograr, de manera económica, la calidad de funcionamiento de los canales de satélite establecida en las Recomendaciones UIT-R S.353, UIT-R S.522, UIT-R S.614 y UIT-R S.579 recurriendo únicamente al margen de potencia;
- d) que se han desarrollado varios sistemas para solucionar el problema de la atenuación debida a la lluvia, cuyo comportamiento y complejidad son tales que su aplicabilidad depende del tipo particular de la red correspondiente,

recomienda

1 que el material contenido en el Anexo 1 sirva de orientación para planificar la utilización de técnicas contra el desvanecimiento en el servicio fijo por satélite.

NOTA 1 – Cabe señalar que las técnicas descritas pueden utilizarse de forma combinada, siempre que no exista incompatibilidad básica entre ellas.

ANEXO 1

**Medidas contra el desvanecimiento en los sistemas
de comunicaciones por satélite****1 Funcionamiento con diversidad de emplazamientos****1.1 Consideraciones generales de diseño**

La calidad de funcionamiento requerida para las estaciones terrenas con diversidad no sólo depende de las zonas hidrometeorológicas, sino también de la configuración con diversidad. La primera clase de configuración es con diversidad equilibrada (diversidad por dos estaciones terrenas con la misma calidad de funcionamiento). La otra configuración es con diversidad desequilibrada. En esta configuración, la calidad de funcionamiento de una estación (estación principal) es lo

* La Comisión de Estudio 4 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2001 de conformidad con la Resolución UIT-R 44 (AR-2000).

suficientemente elevada para que los requisitos de calidad de funcionamiento de la otra estación (subestación) puedan reducirse considerablemente. Cabe esperar la configuración con diversidad desequilibrada cuando la antena de la estación principal está provista de un alimentador en múltiples bandas de frecuencias como 6/4 GHz y 14/11 GHz, y/o cuando la subestación ha de simplificarse por razones técnicas o de explotación.

En el Cuadro 1 se resumen, a título de ejemplo, los resultados de cálculos del diámetro de la antena y de la máxima potencia de transmisión requerida para enlaces con diversidad equilibrada y ángulos de elevación reducidos. Se indican las estimaciones para dos enlaces con diversidad supuestos: (A) Yamaguchi-Hofu (distancia de diversidad = 20 km) y (B) Yamaguchi-Hamada (100 km), ambos en Japón.

Como puede verse en este Cuadro, los diámetros de la antena requeridos para el enlace MF en 14/11 GHz (14 GHz para enlace ascendente y 11 GHz para el descendente) son aproximadamente de 28 m y 19 m, en los casos (A) y (B), respectivamente. Cuando el diámetro de la estación principal puede aumentarse con respecto a esos valores, el diámetro requerido de la subestación disminuye. Los valores indicados en este Cuadro se obtienen utilizando muchos de los parámetros del enlace establecidos para los satélites Intelsat-V, por lo que están sometidos a variación cuando los parámetros del enlace difieren de los utilizados aquí.

CUADRO 1

Ejemplos de cálculos de la calidad de funcionamiento requerida para enlaces con diversidad equilibrada y ángulos de elevación reducidos (14/11 GHz)

Ubicación	(A) Yamaguchi-Hofu	(B) Yamaguchi-Hamada
Ángulo de elevación (grados)	9,1 9,1	9,1 8,4
Distancia de diversidad (km)	20	100
MF		
Diámetro requerido de la antena (m)	28/32	19/22
Potencia requerida de transmisión ⁽¹⁾ (W) (valor máximo)	730	510
AMDT ⁽²⁾		
Diámetro requerido de la antena (m)	17/19	11/12
Potencia requerida de transmisión (W) (valor máximo)	530	400

(1) Valores para portadora MDF-MF de 792 canales (25 MHz).

(2) Valores cuando se emplea la MDPC cuadrivalente a 120 Mbit/s con corrección de errores en recepción (FEC).

Hipótesis:

Frecuencia: 14,5 (enlace ascendente)/11,7 (enlace descendente) GHz

Posición orbital del satélite: 63° E, 0° N

p.i.r.e. del satélite: 41,1 dBW

Los diámetros de la antena han sido estimados en dos casos:

$$T_s = 50 \text{ K y } T_s = 150 \text{ K}$$

T_s : temperatura de ruido del sistema de la antena de la estación terrena

Eficacia de la antena de la estación terrena: 65%

Las estimaciones se basan en las estadísticas de intensidad de la lluvia obtenidas para esas ubicaciones.

Los métodos de cálculo de las calidades de funcionamiento requeridas (diámetro de la antena y p.i.r.e.) para las estaciones terrenas con diversidad difieren según las configuraciones que emplean la diversidad. Para diseñar un enlace con diversidad equilibrada, los cálculos han de basarse en la distribución conjunta de probabilidad de la atenuación debida a la lluvia en ambas ubicaciones, en tanto que, en el caso de una configuración con diversidad desequilibrada, son necesarias la distribución acumulativa en el tiempo de la atenuación debida a la lluvia y la probabilidad condicional de la atenuación.

La probabilidad condicional $P(L''/L')$ es la probabilidad con la que la atenuación debida a la lluvia en la ubicación de la subestación rebase L'' , a condición de que la atenuación debida a la lluvia en la ubicación principal rebase L' .

Para realizar estimaciones fidedignas de los requisitos de las estaciones terrenas se precisan estadísticas fiables, sobre la base de mediciones de la propagación a largo plazo.

1.2 Operación de conmutación en el caso de diversidad de emplazamientos

La explotación de estaciones terrenas con diversidad, debe hacerse cuidando la operación de conmutación, pues al producirse ésta, puede producirse una pérdida de señal o solapamiento de corta duración debido a la diferencia de longitud entre los trayectos de las rutas con diversidad o a discontinuidades en la fase de la portadora.

En las transmisiones analógicas como son las MF-AMDF, la conmutación en transmisión necesariamente producirá discontinuidad en la fase de la portadora, lo que dará lugar a una discontinuidad de la señal a la salida del demodulador en las estaciones terrenas de recepción. Puede evitarse la discontinuidad de la señal debida a la conmutación en la estación terrena de recepción con un ajuste cuidadoso de la longitud del trayecto radioeléctrico de cada enlace con diversidad medida desde el equipo de conmutación hasta el satélite.

En las transmisiones digitales es posible evitar las discontinuidades de la señal aun en el caso de conmutación en la estación terrena de transmisión, disponiendo intervalos ficticios en la secuencia de señal de transmisión y efectuando la conmutación en el intervalo ficticio. En las estaciones terrenas de recepción, los intervalos ficticios deben descartarse independientemente de que se produzca o no conmutación.

La conmutación con continuidad en transmisión y recepción en un sistema con diversidad puede lograrse muy convenientemente en transmisión AMDT. Los intervalos ficticios están incorporados, pues la transmisión AMDT ocupa sólo una parte de la trama AMDT. Además, en transmisiones AMDT los demoduladores son aptos para recibir portadoras en forma de ráfagas de fase incoherente. Por tanto, la incoherencia de fase de las portadoras AMDT no causa dificultad alguna. El único problema posible asociado al funcionamiento por diversidad de emplazamientos en la transmisión AMDT sería la necesidad de transmitir con gran precisión el control de temporización incluso en la transmisión inicial desde la estación de reserva. Esto puede resolverse bien sea por transmisión continua de una ráfaga ficticia desde la estación de reserva o bien obteniendo datos de la distancia del satélite suficientemente exactos, lo que es posible cuando el sistema AMDT emplea sincronización en bucle abierto. En la transmisión AMDT pueden igualarse las longitudes de los trayectos de las rutas de diversidad utilizando la temporización de recepción de las señales de sincronización de trama. La temporización de recepción de las señales de ambas rutas de diversidad puede igualarse automáticamente controlando una línea de retardo variable insertada en una de las rutas de diversidad. Se ha comprobado un sistema experimental que utiliza la técnica de ráfaga ficticia.

En la elección de ruta en la operación por diversidad, es necesario medir la calidad de transmisión de las rutas con diversidad. Dado que el efecto de la diversidad puede degradarse según la elección del método de medición de la calidad del enlace, hay que tener cuidado al elegir el tiempo de medición y la precisión realizable.

1.3 Enlace de interconexión para recepción por diversidad

Ha de tenerse en cuenta que el circuito ficticio de referencia del UIT-R, descrito en la Recomendación UIT-R S.352 y el trayecto digital ficticio de referencia del UIT-R que figura en la Recomendación UIT-R S.521, comprenden enlaces de interconexión para recepción por diversidad (EID) hasta el punto de conmutación por diversidad y todo el equipo adicional de modulación-demodulación necesario. Ello significa que los valores de ruido del sistema han de incluir los efectos de los EID.

1.3.1 Configuración básica

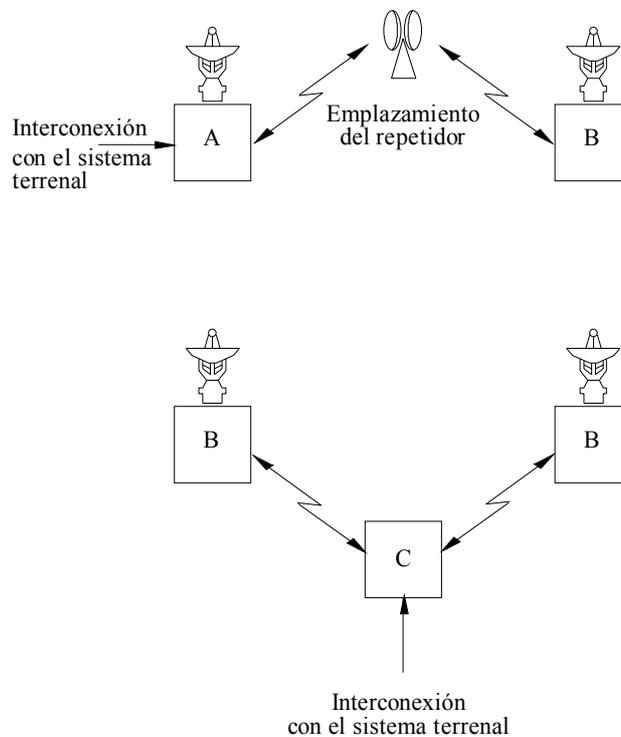
1.3.1.1 Aspectos físicos

Son posibles diversas configuraciones de especificaciones diferentes, pudiéndose aducir argumentos para preferir una u otra. Dos de ellas se identifican en este Anexo y se describen a continuación (véase la Fig. 1):

- Un emplazamiento principal en que se instalan el equipo de conmutación de diversidad y el equipo de interfaz con el radioenlace terrenal. Se efectúa la conexión del emplazamiento de diversidad mediante un EID que utiliza un radioenlace de microondas de dos tramos, con un repetidor activo o pasivo. (Se supone un repetidor, ya que existen pocas probabilidades de visibilidad mutua entre los emplazamientos de diversidad.)
- Dos emplazamientos de diversidad y un emplazamiento de control independiente que comprenda el equipo de interfaz y de conmutación de diversidad; radioenlaces de microondas de un solo tramo entre cada emplazamiento de diversidad y el emplazamiento de control.

FIGURA 1

Configuraciones de diversidad



A: Emplazamiento principal
 B: Emplazamientos de diversidad
 C: Emplazamiento de control

Es posible que para el EID también puedan emplearse enlaces por cable o por guías de onda. Cuando en una estación terrena se utilizan la técnica MDF-MF y la técnica MDT (AMDF o AMDT) se necesitan usualmente dos enlaces en paralelo.

1.3.1.2 Requisitos de modulación

Cuando se emplea MDF-MF dado que tanto las características de modulación como la configuración de banda de base que se utilizan en los enlaces por satélite son diferentes de las que se utilizan habitualmente para los sistemas terrenales, será necesario proceder a una remodulación. La diferencia principal reside en la forma de disponer los canales. En el sistema terrenal los canales se suelen combinar en una o más bandas de base en cada dirección y se aplica un índice de modulación relativamente bajo. En la estación terrena las bandas de base del sistema terrenal se reparten en varias bandas de base de composición diferente de las del sistema terrenal, para transmisión a múltiples destinos, y se utiliza un índice de modulación distinto. Las bandas de base en recepción son todavía más numerosas y pueden consistir simplemente en unos cuantos canales, que han de combinarse de nuevo para formar las bandas de base de los enlaces terrenales. Este proceso requiere equipo de modulación-demodulación en el emplazamiento principal de la estación terrena y en el emplazamiento de diversidad, donde se utiliza un diseño clásico para el EID. Utilizando la técnica de remodulación pueden aplicarse todas las configuraciones, a condición de disponer de equipo doble en el punto de diversidad.

Una técnica alternativa consiste en utilizar en el sistema terrenal los mismos esquemas de modulación que en el sistema por satélite. Esta técnica parece factible, aunque no sea clásica. Tiene como incentivo el que permitiría economizar el costo del equipo de remodulación, quizá a costa de algunos gastos adicionales en el sistema terrenal, si bien es posible que puedan realizarse también economías en este último sistema. El empleo de la técnica que acaba de describirse es únicamente aplicable con la segunda configuración de la Fig. 1. Cuando se emplea MDT (AMDF o AMDT) puede utilizarse cualquiera de estas técnicas. En el caso del AMDT se efectúa la conmutación de diversidad entre ráfagas (véase el § 1.2). Para el EID podría emplearse el mismo método de modulación que el utilizado en el sistema de satélite, aunque las velocidades de datos, generalmente no serán las mismas que las correspondientes a un sistema digital convencional de relevadores radioeléctricos.

1.3.2 Factores técnicos

1.3.2.1 Elección de frecuencias

La elección de frecuencias para un EID en microondas debe estudiarse cuidadosamente a fin de obtener la necesaria calidad total de funcionamiento. Los textos pertinentes de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones contienen información sobre la propagación en sistemas terrenales de microondas.

1.3.2.2 Anchura de banda necesaria

La relación entre la anchura de banda necesaria para los EID y la anchura de banda de la estación terrena, puede ser igual o inferior a la unidad, según que se recurra o no a la remodulación. Si sólo se efectúa una translación de frecuencias, las necesidades de anchura de banda han de ser iguales (MHz por MHz). Utilizando la remodulación, puede lograrse una mayor densidad de canales empleando índices de modulación MF más reducidos, pero a expensas de una interfaz múltiple bastante costosa.

1.3.2.3 Atenuación debida a la lluvia

Otros factores son la atenuación debida a la lluvia y las características de los emplazamientos de diversidad, relacionados ambos con el fenómeno de la precipitación. Se prefiere un clima seco. El funcionamiento con diversidad depende de la separación entre emplazamientos. Se prevé una separación de unos 16 km como separación nominal requerida. Se supone que la mejor orientación para la línea de conexión entre los emplazamientos es la que coincide con la perpendicular a la dirección de los fenómenos meteorológicos predominantes, ya que de ese modo es poco probable que las condiciones de atenuación más desfavorable afecten simultáneamente a ambos emplazamientos, y puede lograrse la máxima eficacia para la recepción por diversidad. Aunque sean de importancia secundaria, han de tenerse también en cuenta los efectos meteorológicos sobre los EID que utilizan microondas, si estos radioenlaces funcionan en las bandas de frecuencias superiores.

1.3.2.4 Variaciones del tiempo de transmisión debidas a la conmutación de diversidad

Otro elemento importante está relacionado con el retardo diferencial de propagación de las señales recibidas por diversidad cuando llegan al punto de conmutación.

1.3.3 Consideraciones generales

Los enlaces de interconexión para recepción por diversidad (EID) presentan dos aspectos importantes:

- su contribución al ruido total del sistema, y
- su contribución a las interrupciones del sistema.

Se estudian aquí estas cuestiones para poder examinar con mayor detalle los efectos de los parámetros importantes y su relación con las secciones del sistema que constituyen el enlace por satélite.

Los enlaces para recepción por diversidad pueden diseñarse con arreglo a dos bases de diseño diferentes. Si se elige un método que utilice remodulación, cabe tomar como base de diseño los sistemas clásicos de relevadores radioeléctricos. Si se utiliza el método de traslación de frecuencias, el diseño se basará en un modelo distinto, que será muy similar al de los sistemas por satélite. Los márgenes de desvanecimiento y las fuentes de ruido deben tenerse en cuenta al determinar la calidad total. En el caso especial, en que para el enlace de interconexión por diversidad se utilicen las mismas frecuencias que para el sistema por satélite, debe tomarse también en consideración el ruido interferente.

1.3.3.1 Balances de ruido para sistemas MDF-MF

Hay que procurar que la contribución de ruido total aportado por el EID en el circuito ficticio de referencia sea bastante modesta con objeto de mantener la calidad de funcionamiento del sistema especificada en la Recomendación UIT-R S.353.

Parece lógico suponer que la contribución de ruido aportada por el EID forme parte del valor asignado a la estación terrena (normalmente 1 500 pW0p), ya que dicho enlace EID asegura en realidad una parte de las funciones ordinarias de la estación terrena. Falta por determinar si tal contribución puede mantenerse en un nivel lo suficientemente bajo para que no se rebase el total de 1 500 pW0p. El desvanecimiento en el EID contribuirá, a corto plazo, al valor total de ruido en el enlace.

La contribución de ruido aportada por el EID tendrá componentes que dependerán de la configuración de la instalación y de las bandas de frecuencias utilizadas. Esas componentes son:

a) *Ruido térmico*

Las normas clásicas del UIT-R para los radioenlaces especifican entre 1 y 3 pW0p por km, o incluso menos; este valor puede mantenerse a 10 pW0p, o incluso menos, en el caso de un solo tramo. Algunos diseños especiales permiten obtener valores más pequeños. Los componentes que

varían en función del tiempo, debidos tanto al desvanecimiento por trayectos múltiples como a la atenuación debida a la lluvia, son relativamente importantes, pero tratándose de tramos cortos pueden mantenerse dentro de límites razonables. El ruido térmico está en relación directa, dB por dB, con el desvanecimiento, cualquiera que sea su mecanismo.

b) *Ruido intrínseco de fondo*

Se trata del ruido en banda de base y es aplicable solamente a configuraciones con remodulación. Son corrientes niveles de ruido comprendidos entre 50 y 100 pW0p cuando las bandas de base están interconectadas «espalda con espalda». El límite normal de ruido de una estación terrena tiene en cuenta esta contribución, mientras que una configuración en que se utilizara remodulación aportaría una contribución adicional.

c) *Interferencias*

En algunos casos, otros sistemas de microondas que funcionen en las mismas bandas de frecuencias aportarán una pequeña contribución al ruido. Esta contribución puede considerarse insignificante. En el caso especial en que se reutilice la misma banda de frecuencias, es de prever que los enlaces ascendentes y descendentes producirán interferencia en la estación terrena. En condiciones normales de funcionamiento, se estima que el valor de esta contribución estaría comprendido entre 10 y 100 pW0p. Además, ciertas condiciones de desvanecimiento pueden ir acompañadas de un incremento del ruido durante periodos muy breves, en consonancia con el ruido térmico. Esta configuración no requiere remodulación, de modo que todo el ruido adicional asociado al componente b) no intervendría.

d) *Intermodulación*

Un sistema en el cual se utilice remodulación deberá estar provisto de un par adicional de moduladores-demoduladores y de amplificadores de FI, mientras que en un sistema en que se utilice traslación de frecuencias, el equipo necesario será el clásico de estación terrena, y, por lo tanto, aportará muy poco ruido de intermodulación.

El Cuadro 2 ilustra una posible distribución del ruido:

CUADRO 2

Ejemplos de distribución de ruido – Condiciones de espacio libre				
	Remodulación (2 vanos)		Traslación de frecuencias (1 vano)	
	Débil (pW0p)	Elevado (pW0p)	Débil (pW0p)	Elevado (pW0p)
Ruido térmico	2	20	1	10
Ruido de intermodulación en banda de base	50	100	–	–
Ruido de interferencia	–	–	10	100
Ruido de intermodulación en RF	100	200	20	50
Ruido total (pW0p)	152	320	31	160

1.3.3.2 Balance de ruido para sistemas AMDT

Las contribuciones del EID a la proporción global de errores del trayecto digital ficticio de referencia, deben hacerse razonablemente pequeñas, con objeto de mantener la calidad de funcionamiento del sistema conforme a la presente Recomendación.

Debe observarse que, en el caso de utilizar un EID con remodulación, los errores serán aditivos mientras que en el caso de traslación de frecuencias serán aditivos los efectos del ruido.

1.3.3.3 Consideraciones acerca de las frecuencias

Las características del desvanecimiento en función de la frecuencia, del clima y de la longitud del trayecto que atraviesa zonas de lluvia, pueden derivarse de los diseños clásicos de microondas. La atenuación debida a la lluvia y el desvanecimiento por trayectos múltiples son fenómenos independientes y, en realidad, casi se excluyen mutuamente.

Como la separación prevista para un par de estaciones terrenas que proporcionen una recepción por diversidad es del orden de 16 a 24 km y dado que se prevé también que será necesario un repetidor o un emplazamiento común, la longitud de los trayectos individuales del EID no puede probablemente exceder de 16 km. Para un trayecto de esta longitud, normalmente pueden preverse márgenes lo bastante elevados para acomodar interrupciones de tan corta duración como las que corresponden al 0,001% del tiempo.

2 Control de potencia en el enlace ascendente

2.1 Introducción

Para reducir el efecto de la atenuación en el enlace ascendente puede utilizarse el control de potencia en el enlace ascendente (CPEA) en las bandas de frecuencias más altas (por ejemplo, 14/11 y 30/20 GHz). Esta técnica podría utilizarse para conseguir una explotación eficaz de un sistema de comunicaciones por satélite y para reducir la interferencia causada a otros satélites y a enlaces terrenales, disminuyendo la p.i.r.e. en condiciones de cielo despejado.

2.2 Realización del control de potencia en el enlace ascendente

Hay varios métodos para conseguir el CPEA; los más utilizados son los que se mencionan a continuación.

2.2.1 Métodos de CPEA de bucle abierto

En este método se utiliza la señal de baliza del satélite para medir la atenuación producida por la lluvia en el trayecto descendente. Debido a la correlación entre la atenuación producida por la lluvia en el enlace ascendente y en el descendente, esta medida se utiliza para estimar la atenuación producida por la lluvia en el enlace ascendente y por ende los valores de control del CPEA. La mayoría de los valores de atenuación predichos coinciden con los valores reales; sin embargo, algunos valores no coinciden a causa de las condiciones ambientales, tales como la velocidad del viento o la distribución del tamaño de las gotas de lluvia. En el Cuadro 3 se muestra un ejemplo de los posibles errores en la estimación de la atenuación en el enlace ascendente (14 GHz) a partir de la medición en el enlace descendente (11 GHz).

Se han excluido algunas causas potenciales de error por ser demasiado insignificantes para calcularlas (por ejemplo, errores en el seguimiento de la antena, de apuntamiento del satélite, errores de preacentuación, de degradación de la ganancia de la antena, de efectos de refracción de ángulos de elevación bajos, y de fluctuaciones rápidas del índice de pluviosidad) o por ser de un tipo muy raro (por ejemplo, grandes acumulaciones de nieve húmeda en la antena o fallo de los

circuitos de control o de medición de los enlaces ascendente y descendente). Varias combinaciones de estas causas adicionales de error podrían, a la larga, agravar los errores acumulativos del nivel de potencia del enlace ascendente.

CUADRO 3

Ejemplo de los errores potenciales en el cálculo de la atenuación del enlace ascendente (14 GHz) basado en una medición del enlace descendente (11 GHz)

a) <i>Atenuación menor de 1,0 dB en el enlace ascendente</i>			
	Ángulo de elevación		
	5°	15°	25°
Error debido al equipo ⁽¹⁾	0,725	0,725	0,725
Atenuación por hielo	0,05	0,05	0,05
Vapor de agua/difusión	0,20	0,10	0,05
Nivel en condiciones de cielo despejado	0,10	0,10	0,10
Error máximo del enlace ascendente (dB)	±1,075	±0,975	±0,925
b) <i>Atenuación entre 1 y 6 dB en el enlace ascendente</i>			
	Ángulo de elevación		
	5°	15°	25°
Error debido al equipo ⁽¹⁾	0,725	0,725	0,725
Atenuación por hielo	0,05	0,05	0,05
Distribución de las gotas de lluvia	0,10	0,075	0,05
Vapor de agua/difusión	0,20	0,10	0,05
Nivel en condiciones de cielo despejado	0,10	0,10	0,10
Error de polarización	0,10	0,075	0,05
Error de longitud de trayecto	0,20	0,10	0,05
Capa de fusión	0,05	0,05	0,05
Error máximo del enlace ascendente (dB)	±1,525	±1,275	±1,125
c) <i>Atenuación mayor de 6 dB en el enlace ascendente</i>			
	Ángulo de elevación		
	5°	15°	25°
Error debido al equipo ⁽¹⁾	0,725	0,725	0,725
Atenuación por hielo	0,05	0,05	0,05
Distribución de las gotas de lluvia	0,20	0,15	0,10
Vapor de agua/difusión	0,10	0,075	0,05
Nivel en condiciones de cielo despejado	0,10	0,10	0,10
Error de polarización	0,20	0,15	0,10
Error de longitud del trayecto	0,40	0,25	0,15
Capa de fusión	0,05	0,05	0,05
Error máximo del enlace ascendente (dB)	±1,825	±1,550	±1,325

⁽¹⁾ El supuesto de error de $\pm 0,725$ dB debido al equipo se basa en un error de $\pm 0,5$ dB en la banda de 11,7 GHz (enlace descendente) y suponiendo un factor de dependencia con la frecuencia de 1,45 entre 11,7 GHz y 14 GHz. El error de $\pm 0,5$ dB fue calculado sobre la base de los datos disponibles y requiere una mayor verificación con mediciones adicionales.

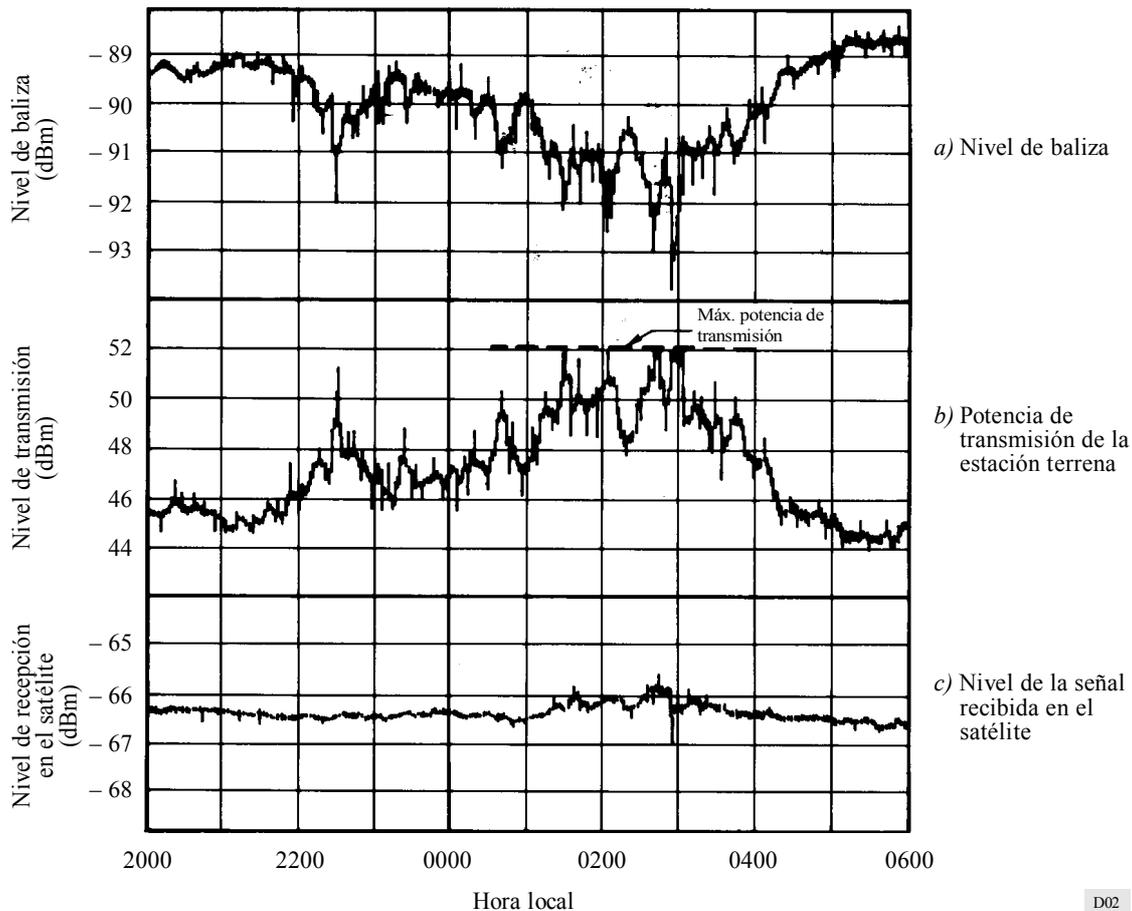
2.2.2 Método de CPEA de bucle cerrado

En este método se compara la señal de baliza del satélite con la relación C/N o S/N del retorno en bucle de una señal piloto o de una señal en un canal especial. De esta forma pueden determinarse la atenuación producida por la lluvia en el trayecto ascendente y el valor de control del CPEA con gran exactitud. Sin embargo, este método presenta el inconveniente de necesitar canales de control separados además de los canales de comunicación.

2.3 Experimento de control de potencia en el enlace ascendente

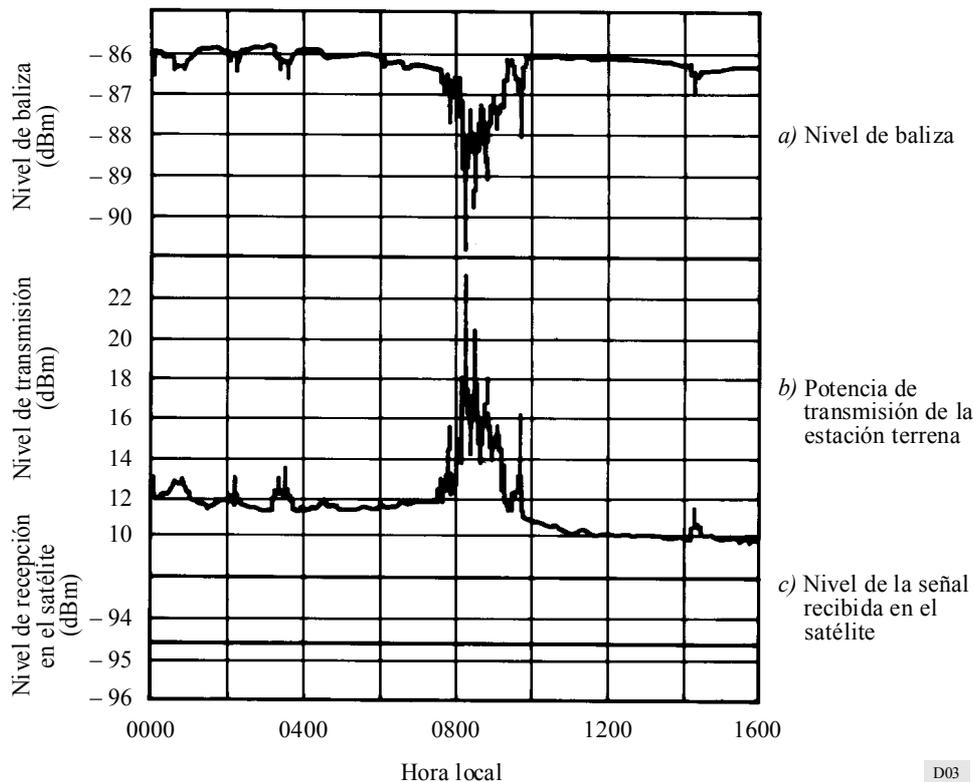
Se realizó un experimento de CPEA de bucle abierto utilizando las bandas 30/20 GHz, cuyos resultados se muestran en la Fig. 2. En este experimento se determinaron los valores de CPEA a partir de los valores de la atenuación en el enlace descendente. En la Fig. 2a) se muestra el nivel de baliza, en la Fig. 2b), el nivel de potencia transmitida del amplificador de gran potencia (AP) y en la Fig. 2c), el nivel de recepción del satélite. Como se muestra, la variación de los valores totales de C/N pueden mantenerse dentro de 1 dB (cresta a cresta) excepto cuando la potencia transmitida requerida rebasa la potencia transmitida máxima.

FIGURA 2
Resultados experimentales de un CPEA de bucle abierto



Se realizó también un experimento de CPEA de bucle cerrado utilizando las bandas de 30/20 GHz con el resultado que aparece en la Fig. 3. El error en el control se mantuvo dentro de un valor de 0,3 dB (cresta a cresta).

FIGURA 3
Resultado experimental de un CPEA de bucle cerrado



D03

2.4 CPEA de bucle abierto utilizando un radiómetro

El control de potencia en el enlace ascendente puede efectuarse utilizando un radiómetro para medir la energía emitida por la lluvia a lo largo del trayecto de propagación hacia el satélite. No se necesita señal piloto ni de baliza. Se eliminan los errores introducidos por los receptores de baliza, tales como la variación de la ganancia con la temperatura del amplificador de bajo ruido, etc.

La relación entre la atenuación producida por las precipitaciones en un trayecto oblicuo y la temperatura de la antena ha sido examinada por varios investigadores. Por lo general, las atenuaciones en el trayecto calculadas a partir de mediciones de la temperatura de la antena tienen una exactitud mejor que 0,5 dB para atenuaciones inferiores a 6 dB (en 12 GHz, en Canadá). En un sistema real, la potencia del enlace ascendente no aumentará probablemente en más de 6 dB. Así pues, puede utilizarse el radiómetro para calcular las atenuaciones en el trayecto en una amplia gama de interés práctico.

El sol estará alineado con la estación terrena, es decir, la antena apuntará al sol durante algunos días cercanos a los equinoccios, cuando la declinación del sol es aproximadamente igual a la del satélite. Para distinguir entre estos aumentos de la temperatura de la antena y los aumentos debidos a la atenuación producida por la lluvia en otros momentos, los ángulos de observación del satélite y del sol se calculan frecuentemente. Cuando la separación angular entre el eje de la antena del radiómetro y el sol es inferior a un ángulo determinado, se supone que el aumento de la temperatura de la antena se debe al sol, y no se puede efectuar el control de potencia en el enlace ascendente.

Se ha desarrollado un sistema de control de potencia en el enlace ascendente basado en estos principios para las bandas de 14/12 GHz, en el cual un radiómetro mide la temperatura de la antena en una banda de frecuencias inferior a la banda del enlace ascendente, calcula la atenuación del trayecto en la frecuencia deseada del enlace ascendente y controla la intensidad de la señal aplicada en FI al convertidor elevador. La temperatura de la antena se mide mediante un nuevo tipo de radiómetro. El principio de funcionamiento difiere fundamentalmente del principio del radiómetro de Dicke convencional, y permite una medida muy estable de la temperatura de la antena. El radiómetro completo está contenido en un cilindro montado en el foco primario de un reflector parabólico. Como la frecuencia del radiómetro debe ser diferente de la del enlace ascendente a fin de que el radiómetro no detecte la energía transmitida que es dispersada, en la dirección del radiómetro, por la lluvia a lo largo del trayecto, se utiliza una frecuencia de radiómetro de 13,3 GHz.

En un experimento en el que se utilizó el sistema descrito, la intensidad de la señal de retorno se comparó con la intensidad de la señal recibida de la baliza del satélite. Se halló una buena correlación entre las fuerzas de las señales, lo cual indica que la fuerza de la señal del enlace ascendente recibida en el satélite fue casi constante, independiente de la atenuación producida por la lluvia. Se obtendrá experiencia de funcionamiento adicional con los dos sistemas de control de potencia en el enlace ascendente que están instalándose actualmente en Canadá.

2.5 Conclusión

El CPEA es una de las técnicas más importantes para establecer sistemas de comunicación por satélite en las bandas de frecuencias más altas. Utilizando el CPEA para las bandas de frecuencias más altas, puede reducirse la interferencia entre sistemas de satélites vecinos y redes terrenales, y así se consigue una utilización eficaz de la órbita de los satélites geoestacionarios y una explotación eficaz del sistema.

Se necesitarán estudios más detallados para obtener métodos más precisos de CPEA.

3 Sistemas de transmisión de información a velocidad variable

3.1 Introducción

La calidad de funcionamiento de los sistemas de transmisión digital puede mejorarse reduciendo de manera adaptativa la velocidad de transmisión cuando las condiciones de propagación sean desfavorables. La transmisión de información a velocidad variable puede hacerse mediante la variación de parámetros (ritmo del reloj y número de estados de fase) de la modulación MDP y mediante la variación de la velocidad de codificación en la corrección de errores sin canal de retorno (FEC). Se ha aplicado también un método de sincronización global con una señal MDP demodulada en un sistema AMDT de velocidad de transmisión variable.

Debe señalarse que es posible que los servicios públicos no puedan estar sujetos a reducción de la velocidad de información, y que en estos casos puede ser necesario adoptar otras contramedidas para el desvanecimiento.

3.2 Sistema de parámetros variables de la modulación MDP

Se han desarrollado varias clases de módems MDP de uso general utilizando procesadores de señal digital con tecnología de LSI. Son módems que funcionan de dos maneras, MDPB y MDP-4, y sus ritmos de reloj de transmisión son variables de manera continua. Funcionan satisfactoriamente con un sistema de velocidad de transmisión variable, pero no se pueden conseguir velocidades de transmisión elevadas, por la limitación que impone la velocidad de funcionamiento del procesador

de señales digitales. Por ejemplo, se ha desarrollado un módem con una velocidad máxima de transmisión de 400 kBd. Este módem puede utilizarse con señales en modo ráfaga. Otro ejemplo es el de un módem que tiene una velocidad máxima de transmisión de 6 MBd. Esta velocidad es variable, pero después de un reajuste de parámetros toma una gran cantidad de tiempo hasta que se alcanza una situación estable.

Llamado γ a la relación de reducción de la velocidad de transmisión, la mejora en la relación C/N viene dada por:

$$\Delta(C/N) = -10 \log \gamma \quad \text{dB}$$

3.3 Sistema de velocidad de codificación variable

Los codificadores convolucionales y los decodificadores Viterbi son codecs adecuados para un sistema de velocidad de codificación variable, porque por lo general son de construcción económica, con tecnología de LSI, y sus ganancias de codificación son elevadas. Se han desarrollado, por ejemplo, codecs de tipo LSI con longitud impuesta de 4 ó 7, velocidad de codificación de 1/2, 2/3, 3/4 ó 7/8 y velocidades de transmisión máximas de 20 a 25 MHz. Uno de estos codecs es de uso general y tiene velocidad de codificación seleccionable.

Cuando se aplica un códec al sistema de transmisión de información a velocidad variable, la mejora de la relación C/N viene dada por:

$$\Delta(C/N) = 10 \log (R_o/R_a) + G_a - G_o \quad \text{dB}$$

donde

R_o : es la velocidad de codificación

G_o : es la ganancia de codificación al funcionar en condiciones de cielo despejado

R_a, G_a : son esos mismos parámetros en condiciones de lluvia.

3.4 Sistema de transmisión a velocidad variable que utiliza espectro ensanchado y técnicas de sincronización globales

Existe otro método dentro de la categoría de transmisión a velocidad variable. Un tren de bits de datos en banda de base (bit de información o de corrección de errores) es aleatorizado mediante un código pseudoaleatorio, con ritmo de reloj constante, y a continuación modulado en MDP. La velocidad de transmisión puede variarse cambiando la relación entre la velocidad de bits de datos y la del reloj del código pseudoaleatorio. La relación seleccionada debe ser igual a $1/n$, siendo n un número entero y positivo. En un receptor, la señal aleatorizada es demodulada MDP a la velocidad del reloj del código pseudoaleatorio, y desaleatorizada mediante ese mismo código. Tras la sincronización del código pseudoaleatorio se detectan los bits de datos en banda base.

Esta técnica se ha aplicado a un sistema AMDT de velocidad de transmisión variable, en el que la velocidad de transmisión varía de manera autoadaptativa en cada ráfaga de AMDT. Las pruebas experimentales han demostrado que la degradación de la calidad relativa a la proporción de bits erróneos, comparada con la calidad teórica de funcionamiento en un canal gaussiano, es de menos de 2 dB cuando el sistema de AMDT funciona a una velocidad de $8/n$ Mbit/s ($n = 1, 2, 4, 8, 16, 32$).

Puede considerarse a esta técnica como de modulación y demodulación, capaz de variar las velocidades de transmisión mediante un reloj constante o una velocidad de codificación variable, con ganancia de codificación de 0 dB.

3.5 Conclusiones

Se han examinado tres técnicas de transmisión de información a velocidad variable, consideradas como procedimientos para mantener la calidad de las señales de un sistema digital de comunicaciones por satélite en condiciones de propagación desfavorables.

La técnica basada en la velocidad de codificación variable, empleando un codificador convolucional y decodificador Viterbi es la adecuada en el caso de un sistema de comunicaciones simple con equipos en las estaciones terrenas relativamente económicos y/o sencillos.

Los otros procedimientos deben utilizarse en combinación con una técnica de corrección de errores sin canal de retorno. En el sistema de parámetros variables, sin embargo, no se ha conseguido un módem de velocidad de transmisión variable de manera autoadaptativa con velocidad máxima superior a 400 kBd. El procedimiento de transmisión a velocidad variable que emplea la sincronización global es más adecuado para un sistema AMDT que para uno SCPC.

4 Medidas contra el desvanecimiento que emplean técnicas de acceso múltiple por división de tiempo

4.1 Introducción

La técnica contra el desvanecimiento utilizando AMDT (FCM-AMDT) es un método para contrarrestar los graves efectos de las precipitaciones en frecuencias elevadas; es un sistema adaptable que asigna un recurso de tiempo suplementario a las portadoras que sufren desvanecimiento, en una red AMDT, lo que da lugar a una proporción de errores aceptable en un entorno que presenta una relación portadora/ruido degradada durante desvanecimientos.

En el sistema FCM-AMDT, una porción de la trama se reserva como recurso compartido, destinado a las portadoras que sufren desvanecimiento. Esto supone que la eficacia de la trama, y por ende la capacidad del sistema citado, es inferior a la del sistema AMDT convencional equivalente en condiciones de atmósfera despejada. Normalmente, el periodo de la trama no es variable, pero cualquier ráfaga que sufre desvanecimiento se expande en el tiempo dentro de la trama. Esto significa que una ráfaga conserva el mismo número de bits de información (de usuario) cuando se expande y, por consiguiente, la velocidad de información permanece invariable. Por tanto, esa técnica es particularmente adecuada para los servicios/redes públicos conmutados, en los cuales las técnicas de velocidad de transmisión de información variable (véase el § 3) pueden no ser apropiadas.

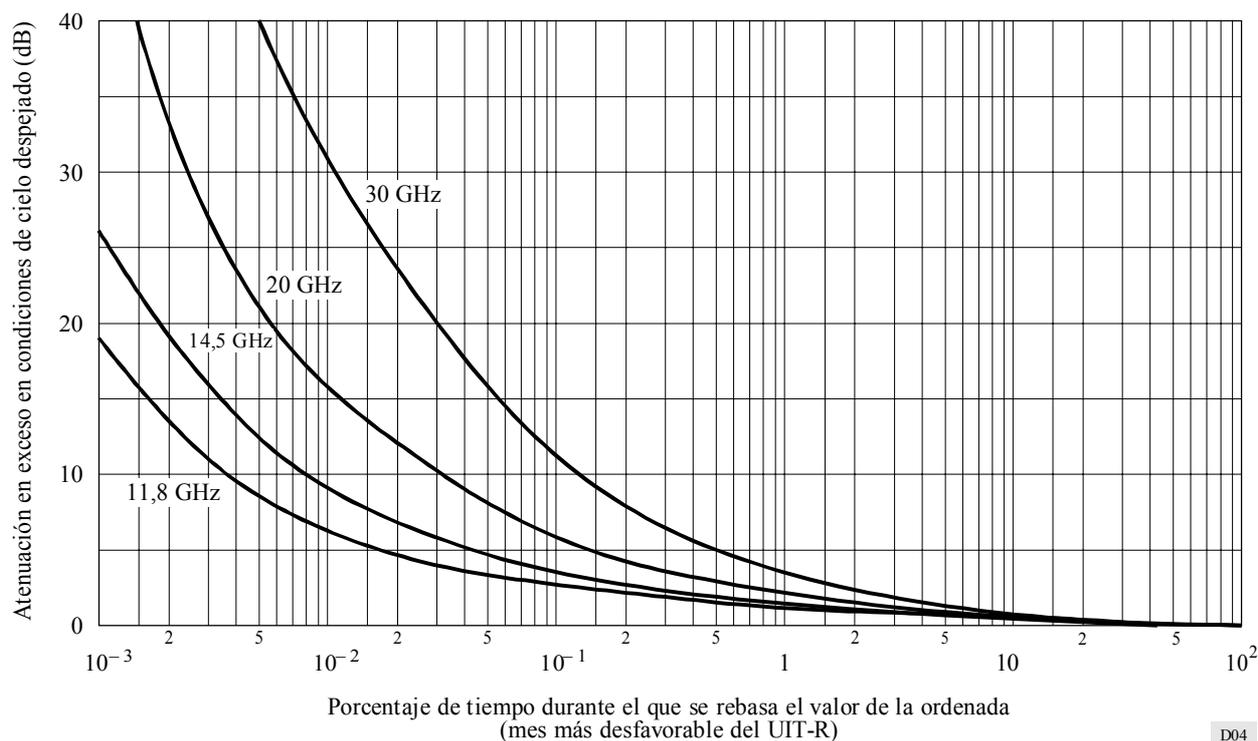
Sólo hay que ampliar cada una de las ráfagas en la medida necesaria para contrarrestar los desvanecimientos que se experimenten en un encaminamiento determinado, ya sea en el enlace ascendente, en el descendente o en ambos, para maximizar la eficacia del sistema.

4.2 Estadísticas de tiempo-espacio del desvanecimiento atmosférico en la banda 30/20 GHz

En Martlesham Heath, Costa Este del Reino Unido (zona climática E del UIT-R) se han llevado a cabo una serie de mediciones durante 43 meses en la banda 14/12 GHz en un trayecto de 30° de elevación al satélite OTS2. Los resultados de estas mediciones para una sola ubicación se trasladaron a la banda de 30/20 GHz utilizando las relaciones de extrapolación de frecuencias del UIT-R y aparecen resumidos en la Fig. 4, que representa los valores estadísticos de la atenuación en el mes más desfavorable. A continuación, utilizando los datos medidos se elaboró un modelo de computador para predecir los valores estadísticos del desvanecimiento simultáneo en dos o más enlaces en la zona de cobertura del satélite, suponiendo que todos los enlaces tienen acceso a los recursos de reserva, para estimar la mejora que proporcionaría un sistema de AMDT adaptable para la disponibilidad del enlace.

Se creó un modelo de desvanecimiento simultáneo en n estaciones en una zona circular de diámetro d , tomando n puntos de tiempo de la base de datos medidos (antes mencionada) en un intervalo de tiempo t , estando t y d relacionados por un factor de 30 km/h; es decir, la velocidad del viento «efectiva» en el Reino Unido durante periodos de precipitación. A continuación se recopilaron los valores estadísticos a largo plazo desplazando esta ventana de anchura t en toda la base de datos de 43 meses y efectuando una conversión a los valores estadísticos del mes más desfavorable del UIT-R.

FIGURA 4
Curvas típicas que relacionan la atenuación con la disponibilidad en un solo emplazamiento
(mes más desfavorable del UIT-R)



D04

Se ha llevado a cabo un extenso trabajo para comparar este modelo con las mediciones directas efectuadas en distancias conocidas y para verificar la validez del factor de conversión de 30 km/hora. Se han hecho comparaciones con:

- el modelo Hodge de diversidad de emplazamientos (hasta 10 km),
- las correlaciones de intensidad de lluvia (hasta 400 km),
- los datos de centros meteorológicos (hasta 1 200 km).

Se ha obtenido una aproximación bastante buena de los datos/modelos antes mencionados con el modelo utilizado y el factor de conversión de 30 km/hora para distancias superiores a 10 km.

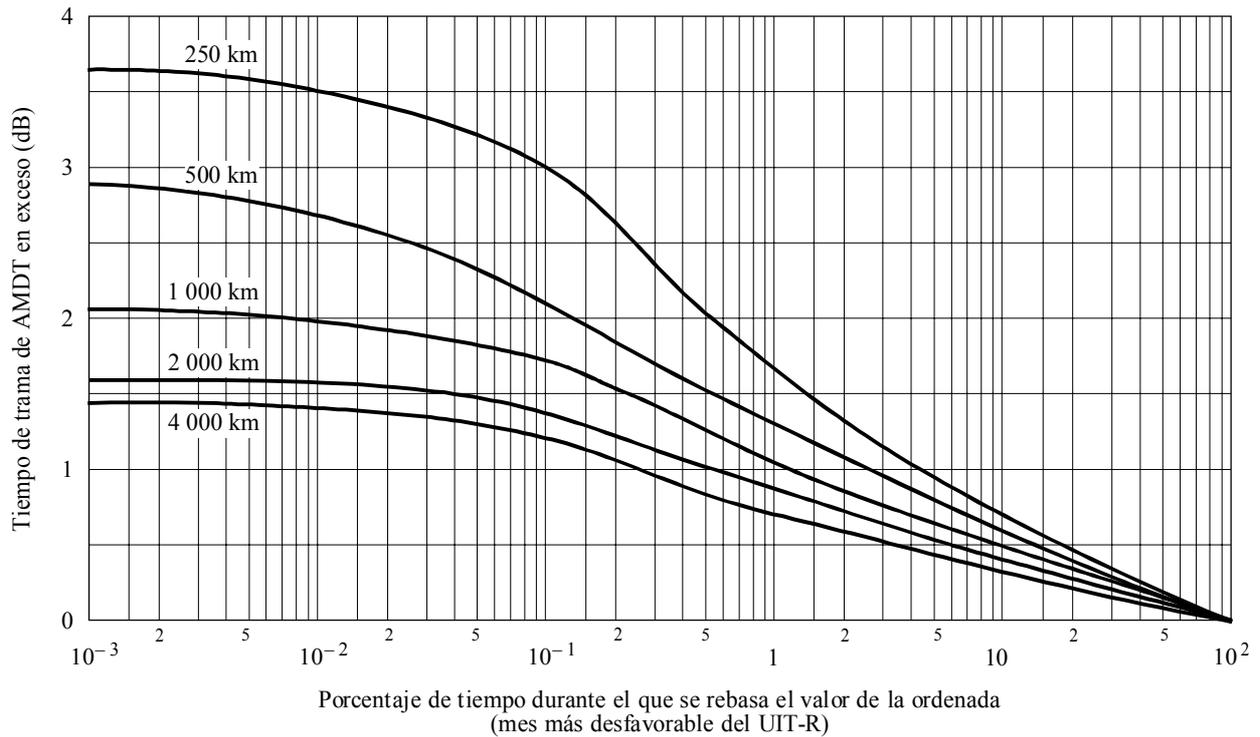
El modelo se utilizó para recopilar los valores estadísticos del tiempo de la trama AMDT de reserva necesario en el satélite para mantener un valor adecuado de la relación E_b/N_0 en los enlaces descendentes en 20 GHz a redes ficticias con distintos números de estaciones terrenas.

Se determinó que si el tiempo de la trama en el conjunto de reserva es suficiente para mantener la interrupción indicada en la Fig. 5 en un valor por debajo de 0,01%, y la interrupción global será dominada por la interrupción en una sola ubicación indicada en la Fig. 4.

Según la topología de la red, conviene considerar diversas técnicas de compensación del desvanecimiento en el enlace ascendente (tales como variación de la velocidad de transmisión).

FIGURA 5

Curvas típicas que relacionan la potencia del satélite en exceso con la disponibilidad del sistema



100 estaciones en zonas de diversos diámetros, frecuencia: 20 GHz, corte de una sola estación: 15 dB

D05

4.3 Métodos para utilizar una ráfaga ampliada con el fin de obtener ciertos grados de inmunidad al ruido

Existen distintas maneras de utilizar el tiempo suplementario que ofrece un intervalo de tiempo ampliado, para conseguir un mayor grado de inmunidad contra el ruido; a continuación se dan ejemplos:

a) *FEC*

Se pueden introducir por etapas distintas velocidades de bits de encabezamiento FEC, a medida que aumenta la profundidad de los desvanecimientos, extendiendo el intervalo de tiempo en la medida necesaria.

b) *Reducción de la velocidad de transmisión de datos*

Se puede reducir la velocidad de transmisión de datos y mantener la misma velocidad de información incrementando la longitud de la ráfaga. Si se reduce la velocidad de transmisión de datos también puede reducirse la anchura de banda del ruido en el receptor, consiguiendo así una mayor inmunidad al ruido.

c) *Repetición de los datos de usuario dentro de la ráfaga*

Una ráfaga que sufra desvanecimiento puede repetirse cierto número de veces y se puede utilizar un demodulador muy elaborado para interpretar la señal recibida tomando un valor medio para cada símbolo.

Todas las técnicas mencionadas anteriormente tienen repercusiones en el diseño del módem y debe tenerse cuidado de asegurar que la sincronización de reloj y de portadora se mantiene durante un desvanecimiento. Además, si la velocidad de símbolos se modifica (con el resultado de una variación de los espectros y de la densidad de flujo de potencia entre ráfagas) puede haber también repercusiones de interferencia.

La profundidad de desvanecimiento que pueda encontrarse varía de acuerdo con el método empleado y el grado de perfeccionamiento que puede incorporarse en el módem. En la práctica, es preferible un sistema FCM-AMDT compuesto; por ejemplo, podría utilizarse FEC adaptable junto con cualquier otro de los métodos presentados, y hay buenas razones para utilizar FEC permanente junto con el método c).

4.4 Control del sistema

Los sistemas FCM-AMDT necesitarán protocolos y mecanismos de control robustos para identificar el inicio y el nivel del desvanecimiento en cualquier encaminamiento, para determinar cuáles ráfagas necesitan ser expandidas y en qué medida, y para realizar tales expansiones junto con cualquier revisión del plan de división de tiempo.

4.5 Conclusiones

El sistema FCM-AMDT tiene que adecuarse a las necesidades. Se deben determinar muchos parámetros del sistema, por ejemplo, la expansión máxima que se le ha de dar a una ráfaga en particular, el tamaño del escalón de expansión, el tiempo de realización o de reacción al inicio del desvanecimiento, el porcentaje de la trama que hay que adjudicar al recurso compartido, y otros. El valor de estos parámetros dependerá de la naturaleza de la red, de las condiciones climatológicas de la región, de la profundidad máxima del desvanecimiento que ha de contrarrestarse, y del número y la combinación de velocidades de datos de las portadoras.

También podría combinarse la técnica FCM-AMDT con otros sistemas para contrarrestar los desvanecimientos, por ejemplo, podrían elaborarse protocolos FCM-AMDT para incorporar un control del enlace ascendente, o también podría combinarse esta técnica con un sistema de diversidad de frecuencias en el que las ráfagas afectadas por desvanecimiento grave se transmitan en una trama AMDT alternativa a una frecuencia más baja.

En el Reino Unido se han llevado a cabo extensos trabajos para modelar las estadísticas «espacio-tiempo» y demostrar la viabilidad de la AMDT adaptativa utilizando métodos de replicación de datos. Aunque ello exigiría el funcionamiento del demodulador con relaciones E_b/N_0 muy bajas durante los desvanecimientos, se han realizado con éxito experimentos de laboratorio para relaciones E_b/N_0 de hasta -8 dB. Sin embargo, para elaborar un sistema práctico es necesario continuar el trabajo relativo al modelado y a los equipos.

5 Técnicas de diversidad de frecuencias

5.1 Introducción

La diversidad en frecuencias en dos bandas es un método adaptable contra el desvanecimiento causado por la atenuación debida a la lluvia aplicable en el caso de satélites que funcionan en dos bandas de frecuencias; normalmente se trata de una banda de frecuencias altas tal como la banda 30/20 GHz, y una banda de frecuencias más baja, tal como la banda 14/11 GHz o la banda 6/4 GHz.

Generalmente el tráfico se encamina a través de la banda de frecuencias altas (30/20 GHz), donde se dispone de una gran anchura de banda. Cuando el margen de potencia de un enlace determinado que funciona en la banda 30/20 GHz no es suficiente para superar la atenuación debida a la lluvia, el tráfico cursado por este enlace se conmuta a la banda de frecuencias más bajas, que resulta menos afectada por la lluvia.

La capacidad de reserva en la banda de frecuencias más bajas, que se comparte entre las estaciones que en un instante determinado necesitan protección contra el desvanecimiento, se denomina en este caso recurso compartido o banda de reserva.

La diversidad de frecuencias en dos bandas proporciona una ganancia de potencia equivalente grande, puesto que para una característica de interrupción total determinada, el tiempo de interrupción aceptable en el enlace que utiliza la banda de frecuencias altas (30/20 GHz) aumenta considerablemente; por lo que es admisible una atenuación mucho mayor del enlace.

Por regla general, la utilización de un conjunto de canales de reserva es una solución eficaz considerando que, por término medio, el número de enlaces que requieren simultáneamente capacidad de reserva es reducido.

En el § 5.2 se realiza un análisis teórico de un sistema de diversidad de frecuencias, para evaluar el número de canales de reserva necesarios para contrarrestar el desvanecimiento en una red de satélite.

En el § 5.3 se indican algunos problemas que surgen en el diseño del sistema de control de las medidas adaptables contra el desvanecimiento.

Por último, el § 5.4 señala los efectos de los distintos procedimientos de conmutación en la calidad de funcionamiento. Estos efectos se han obtenido simulando el sistema basándose en las series temporales de atenuación en 11,6 GHz, medidos durante un periodo de cuatro años.

5.2 Análisis del sistema

Se supone una red de comunicaciones por satélite de N estaciones como, por ejemplo, un sistema AMDT que funciona normalmente en la banda de frecuencias 30/20 GHz con una capacidad de reserva disponible en una banda de frecuencias más bajas (14/11 GHz o 6/4 GHz). La interrupción en el enlace entre dos estaciones A y B aparece cuando se produce en A o en B un desvanecimiento de mayor duración que el valor umbral especificado y en ese instante no se dispone de capacidad de reserva. Ello sucede cuando los canales de reserva ya han sido asignados para proteger otros enlaces con desvanecimiento y, por consiguiente, no puede satisfacerse ninguna otra petición.

Para evaluar la probabilidad de interrupción causada por la atenuación debida a la lluvia, es preciso conocer los valores estadísticos conjuntos de los desvanecimientos en los emplazamientos de las N estaciones. Estos valores dependen de la configuración geográfica particular de la red. Para llevar a cabo un análisis general se utiliza un modelo sencillo.

El valor medio anual de la probabilidad de interrupción para una estación determinada se representa por la letra p (incluso si no es necesario, para mayor sencillez se supone que p es igual para las N estaciones). Debe tenerse en cuenta el hecho de que los desvanecimientos en emplazamientos distintos no son, en general, estadísticamente independientes debido a la correlación en el tiempo (estacional) y en el espacio (geográfica). Se supone que la probabilidad condicional de que se produzca desvanecimiento en la estación B (suceso F_B), considerando que existe desvanecimiento en la estación A (suceso F_A) no es simplemente p , como en el caso de independencia estadística, sino que se incrementa por un factor $\alpha \beta$:

$$P(F_B/F_A) = \alpha \beta p \quad (1)$$

El factor de correlación estacional es α y el factor de correlación geográfica es β . El factor β puede suponerse igual a la unidad cuando las estaciones A y B están muy distantes, pero de no ser así, será mayor que la unidad puesto que puede existir correlación entre la intensidad de lluvia en diferentes ubicaciones aún cuando éstas estén separadas por centenares de kilómetros.

Para generalizar la ecuación (1), la probabilidad conjunta de desvanecimiento en las estaciones 1, 2, ..., M condicionada por el suceso F_A puede expresarse como:

$$P(F_1, F_2, \dots, F_M / F_A) = (\alpha \beta)^M P(F_1) \dots P(F_M) = (\alpha \beta p)^M \quad (2)$$

Basándose en este modelo, puede evaluarse la probabilidad de interrupción en la estación A, $P(INT_A)$, calculando la probabilidad de que no haya capacidad de reserva disponible cuando aparece desvanecimiento en A. Si la capacidad de reserva consiste en k canales de reserva en una banda de frecuencias más baja, la probabilidad de interrupción en una estación A determinada puede obtenerse mediante la fórmula (2):

$$P(INT_A) = p \sum_{j=k}^{N-1} \frac{j+1-k}{j+1} \binom{N-1}{j} (\alpha \beta p)^j (1 - \alpha \beta p)^{N-1-j} \quad (3)$$

siendo:

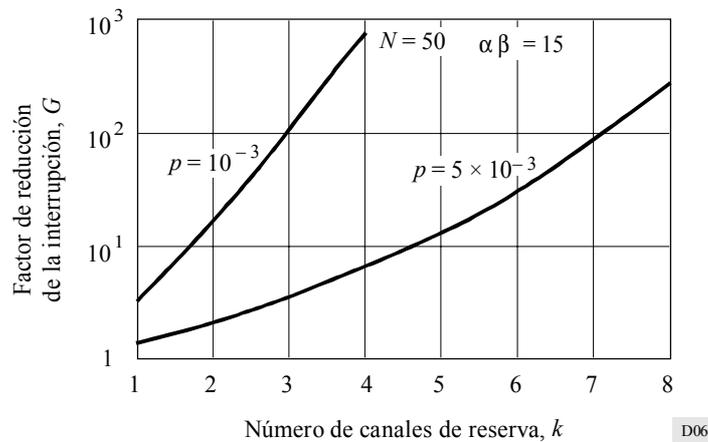
k : el número total de canales de reserva disponibles.

El factor $(j+1-k)/(j+1)$ representa la probabilidad de que no se asigne a A ningún canal de reserva del conjunto cuando, además de A, solicitan un canal de reserva j estaciones con desvanecimiento ($j \geq k$). Cabe señalar que la probabilidad de interrupción para el enlace (A, B) es aproximadamente el doble de la probabilidad de interrupción en la estación A (o B) si la probabilidad conjunta de desvanecimiento en A y B es mucho menor que la probabilidad de desvanecimiento en A (o B). A título de ejemplo, la Fig. 6 muestra el factor de reducción de la interrupción (relación entre la probabilidad de interrupción con diversidad de frecuencia y sin diversidad) en función del número de canales de reserva k para un caso particular, a saber, para $N = 50$ y $\alpha \beta = 15$. Las curvas corresponden a dos valores de p , probabilidad de interrupción cuando el sistema no está protegido con diversidad de frecuencia. La probabilidad p depende del margen de potencia incorporado en el transmisor de la estación. La probabilidad de que se rebase un valor dado de la atenuación A depende de la frecuencia y de las condiciones meteorológicas en el emplazamiento de cada estación. Para los cálculos, en el ejemplo se ha supuesto el siguiente valor de la atenuación en función de la distribución acumulativa:

$$A = A_{0,01} - 0,12p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \quad \text{dB} \quad (4)$$

siendo p la probabilidad (en porcentaje para un año medio) de que se rebase la atenuación A. $A_{0,01}$ representa la atenuación rebasada el 0,01% del tiempo y depende de las condiciones meteorológicas en la estación, del ángulo de elevación del trayecto y de la frecuencia del radioenlace Tierra-espacio. Para mostrar ejemplos numéricos, se ha considerado un enlace particular a 30 GHz en el cual $A_{0,01}$ toma el valor 28,5 dB. Evidentemente, cuanto mayor es el valor del factor $\alpha \beta$, mayor es la capacidad de reserva necesaria para proporcionar la disponibilidad requerida. En el ejemplo considerado anteriormente ($N = 50$ estaciones y $\alpha \beta = 15$), se deduce de (3) que para un enlace a 30 GHz con una $p = 5 \times 10^{-3}$, la probabilidad de interrupción con diversidad de frecuencia es inferior a 2×10^{-4} si se utiliza una capacidad de reserva de $k = 6$. En este caso, el enlace se diseña con un margen de potencia correspondiente a $p = 5 \times 10^{-3}$, es decir 4,9 dB. Para obtener el mismo resultado de interrupción sin protección con diversidad de frecuencia, se necesita un margen de potencia de 21,7 dB de acuerdo con (4). Obsérvese que el margen de potencia necesario sin diversidad en frecuencias es considerable. Además del mayor coste del enlace, esta elevadísima potencia suplementaria puede causar interferencia a otros radioenlaces.

FIGURA 6

Factor de reducción G , en función del número de canales de reserva, k  p : Probabilidad de interrupción sin diversidad de frecuencias

5.3 Funcionamiento de un sistema de control adaptable y resultados de la simulación

El análisis anterior del funcionamiento de los sistemas con diversidad de frecuencias se ha realizado para el caso ideal, en el cual la conmutación entre el modo normal y el modo asistido (y viceversa) puede realizarse instantáneamente. En un sistema real adaptable para contrarrestar el desvanecimiento, el tiempo de respuesta no es despreciable, especialmente cuando se utiliza capacidad de reserva con asignación a petición; el retardo en el establecimiento de las medidas contra el desvanecimiento o en el restablecimiento de las condiciones iniciales se debe principalmente al tiempo de propagación a través del enlace espacial (desde un terminal a la estación principal y retorno) y depende del protocolo utilizado.

Para detectar los desvanecimientos, un sistema real necesita medir las condiciones instantáneas del canal mediante la supervisión directa de la atenuación o mediante la estimación de la proporción de bits erróneos. Debido al retardo de establecimiento del sistema para contrarrestar el desvanecimiento, dicho sistema debe tener en cuenta las características dinámicas del desvanecimiento, en particular su velocidad de variación y la presencia de fluctuaciones rápidas, para predecir de antemano el instante en que se rebasará el nivel de atenuación S correspondiente a la calidad aceptable mínima, y poder activar a su debido tiempo las medidas contra el desvanecimiento.

La manera más sencilla de hacerlo, es iniciar el procedimiento de establecimiento cuando la atenuación alcanza el nivel $S_1 = S - M$, siendo M un margen adecuado elegido en relación con los valores estadísticos de la velocidad de variación de la atenuación. En lo que concierne a velocidad de variación de la atenuación, se han obtenido algunos datos experimentales para la banda 14/11 GHz.

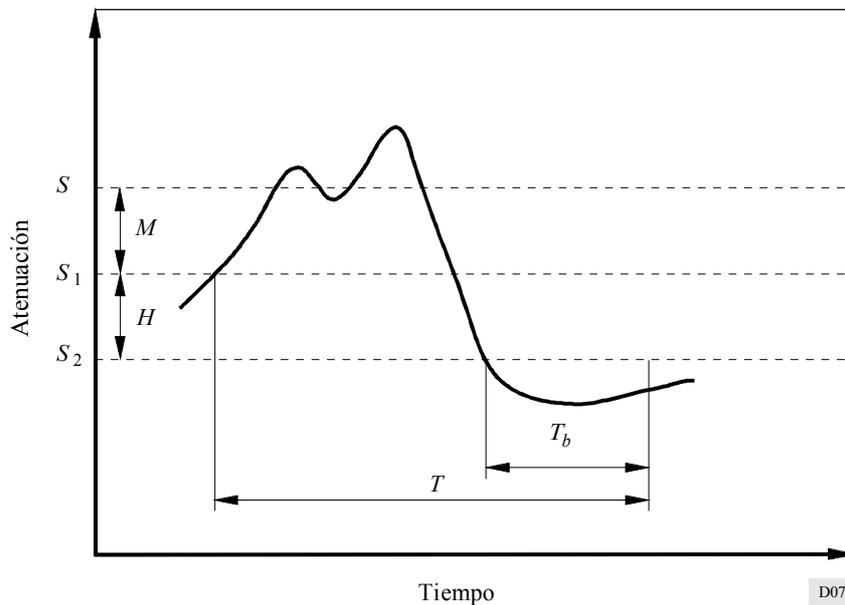
Con objeto de evitar las condiciones de interrupción durante el tiempo de establecimiento, debe elegirse un valor de M suficientemente grande. Por otro lado, un valor demasiado elevado de M puede resultar una utilización ineficaz de las medidas contra el desvanecimiento. La aparición de falsas alarmas supone que el recurso compartido se utilizará más tiempo del necesario y ello puede provocar condiciones de interrupción en el caso de peticiones simultáneas de la capacidad de reserva.

El funcionamiento de este procedimiento de conmutación se ha analizado y comparado con el funcionamiento obtenido mediante predicciones del nivel de atenuación basadas en muestras de atenuación previas. Se han investigado diversos algoritmos para la predicción en tiempo real de la atenuación debida a la lluvia basada en técnicas de regresión lineal. Si bien el algoritmo de

regresión puede predecir la tendencia media de la atenuación, no puede predecir las fluctuaciones muy rápidas del desvanecimiento. Por consiguiente, los resultados presentados se han obtenido aplicando el algoritmo de regresión a un número diverso de muestras previas y añadiendo al valor previsto un desplazamiento constante para contrarrestar las fluctuaciones rápidas. La línea paralela que atraviesa la última muestra se considera en adición a la línea de regresión porque mejora el funcionamiento de la predicción.

La presencia de fluctuaciones de la atenuación relativamente rápidas debe considerarse cuidadosamente al elegir el procedimiento de desactivación de las medidas contra el desvanecimiento, cuando desaparecen las condiciones de éste. En la práctica, puede que convenga filtrar las oscilaciones de la atenuación manteniendo el sistema en las condiciones protegidas (medidas contra el desvanecimiento activadas) mientras la atenuación fluctúa alrededor del umbral $S_1 = S - M$. El margen contra fluctuaciones rápidas se representa por M en el caso del algoritmo de regresión. Una solución consiste en introducir un ciclo de histéresis, H , es decir, desactivar la medida contra el desvanecimiento cuando la atenuación cae por debajo del nivel $S_2 = S_1 - H$. Para obtener una protección adicional contra las fluctuaciones rápidas, la desactivación de las medidas contra el desvanecimiento pueden retardarse un intervalo de tiempo T_b elegido adecuadamente. La desactivación actúa únicamente si la atenuación permanece constantemente por debajo de S_2 durante el intervalo T_b (véase la Fig. 7). La solución de introducir un margen M en la activación, un ciclo de histéresis H y un retardo T_b en la desactivación supone una reducción de la eficacia del sistema con respecto a los sistemas con control ideal en los que $M = H = T_b = 0$, puesto que en este caso el enlace con desvanecimiento utiliza durante más tiempo la capacidad de reserva.

FIGURA 7
Definición de los parámetros que caracterizan el procedimiento de conmutación entre modo normal y modo asistido, o viceversa



Para analizar y comparar el funcionamiento de distintos sistemas de control, se han considerado dos parámetros. El primero de ellos es el porcentaje de aparición de las condiciones de interrupción durante el tiempo de establecimiento, con respecto al número de veces que se proporcionan medidas contra el desvanecimiento al enlace afectado. El segundo es la eficacia del sistema, definida por el factor de utilización $U = (T_{tot} - T_{ideal})/T_{ideal}$, siendo T_{tot} el tiempo de utilización total de la capacidad de reserva en el sistema y T_{ideal} el tiempo de utilización de la capacidad de reserva en un sistema con control ideal.

El funcionamiento del sistema se simuló utilizando las series de tiempos de atenuación a 11,6 GHz medidas con el satélite Sirio a lo largo de un periodo de cuatro años (de 1979 a 1982) en la estación de Spino d'Adda, situada al norte de Italia. Los resultados estadísticos obtenidos son fiables puesto que se dispuso de un volumen de datos experimentales muy grande.

Aunque el análisis del procedimiento de conmutación se basa en las series temporales de atenuación a 11,6 GHz, los resultados de simulación obtenidos proporcionan también una buena estimación del comportamiento estadístico de la conmutación en 20 GHz y 30 GHz, como se indica más adelante.

Cuando los resultados experimentales relativos a la atenuación causada por la lluvia se extrapolaron de las frecuencias más bajas a las frecuencias más elevadas, deben considerarse al menos dos fenómenos: la atenuación debida a los hidrometeoros y el centelleo debido a la propagación por trayectos múltiples (asociados a las variaciones rápidas del índice de refracción equivalente producido por el aire y la dispersión por hidrometeoros).

Se ha estudiado la extrapolación de la atenuación debida a la lluvia medida y se dispone actualmente de una fórmula de extrapolación adecuada. Como la atenuación y el centelleo que aparecen a una frecuencia determinada no se separan en los datos extrapolados, esta fórmula empírica extrapola los efectos de ambos fenómenos a una frecuencia superior.

Actualmente no se dispone de una extrapolación en frecuencia en tiempo real, sin embargo, los resultados estadísticos de la conmutación pueden extrapolarse únicamente de los umbrales fijos en 11,6 GHz a los correspondientes umbrales en 20 GHz o en 30 GHz. Es evidente que estos resultados, desde el punto de vista estadístico, también son válidos en estas frecuencias más altas. De hecho, estas frecuencias no son tan altas como para que se presenten fenómenos físicos inesperados de acuerdo con los pocos resultados conocidos hasta ahora. Las bases físicas de la atenuación debida a la lluvia son bien conocidas y los resultados de los experimentos concuerdan bien con los valores estadísticos previstos a largo plazo de la atenuación. Además, los fundamentos físicos del centelleo en tiempo despejado o húmedo se conocen bien teóricamente y los modelos se han confirmado experimentalmente. Los resultados experimentales en el espectro de potencia de centelleo en 11,6 GHz pueden extrapolarse mediante modelos sencillos a frecuencias más altas. Por ejemplo, considerando las dimensiones de las antenas y las frecuencias de un experimento con diversidad en frecuencia planificado con el satélite europeo Olympus, el espectro de potencia de centelleo medio disminuye con la frecuencia f de acuerdo con la ley teórica $f^{-8/3}$, empezando desde unos 0,5 Hz a 20 GHz hasta unos 0,6 Hz a 30 GHz; esos datos pasan a ser, respectivamente, 1,6 Hz y 2 Hz en el 95% de los casos. A 12,5 GHz las frecuencias correspondientes son de unos 0,4 Hz y 1,3 Hz.

La amplitud de los centelleos aumenta estadísticamente mucho menos que la atenuación debida a la lluvia. La desviación típica del centelleo para un trayecto determinado y condiciones físicas idénticas sólo aumenta como $f^{7/12}$, mientras que la atenuación debida a la lluvia aumenta, aproximadamente, como $f^{1,76}$. En consecuencia, también cabe esperar que el comportamiento dinámico global a 20 GHz y 30 GHz no sea muy distinto del comportamiento medido a 11,6 GHz, una vez extrapolados los umbrales de atenuación.

5.4 Resultados de la simulación

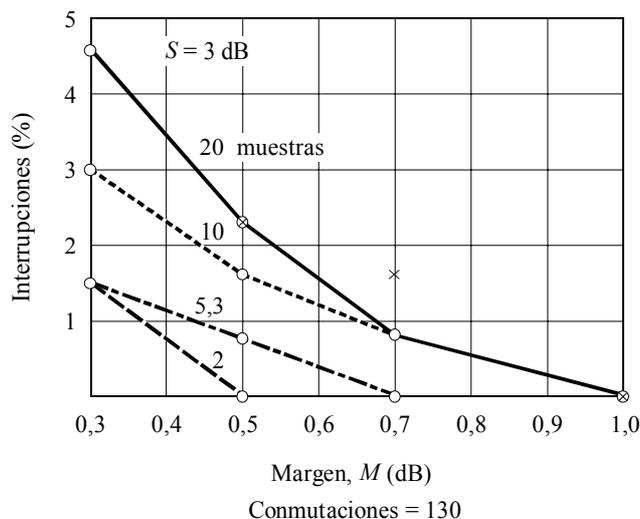
Para comparar el porcentaje de interrupciones durante el tiempo de establecimiento de los diferentes procedimientos de control basándose en el mismo número de procedimientos de conmutación realizados, se ha mantenido constante el umbral S_2 de desactivación. En las Figs. 8 y 9 aparecen los resultados de las simulaciones realizadas considerando un umbral de interrupción $S = 3$ dB, un retardo en el establecimiento $T_c = 2$ s, un umbral de desactivación $S_2 = 1,8$ dB y un intervalo $T_b = 20$ s. El umbral de interrupción se elige de forma que se rebase con una probabilidad aproximada de 10^{-3} a 11,6 GHz en el emplazamiento de Spino d'Adda, lo que corresponde a unos 8 dB a 20 GHz.

El algoritmo de predicción se basa en las últimas 20, 10, 5, 3 y 2 muestras y utiliza un margen contra las fluctuaciones rápidas de 0,3 dB; 0,5 dB; 0,7 dB o 1 dB. Si el nivel de atenuación previsto con un tiempo de anticipación de 2 s (retardo de establecimiento) más un tiempo de guarda de 1 s (la frecuencia de muestreo de la atenuación), rebasa el umbral S , se inicia el procedimiento de establecimiento. Para el algoritmo que utiliza el umbral previamente fijado, se han considerado valores de S_1 de 2,5 dB; 2,3 dB y 2 dB, lo que corresponde a una velocidad de variación de la atenuación admisible de 0,25 dB/s; 0,35 dB/s y 0,5 dB/s.

Los resultados indican que el sistema que utiliza el algoritmo de umbral previamente fijado presenta aproximadamente el mismo comportamiento que el sistema que realiza la predicción basada en las últimas 20 muestras. Con respecto al porcentaje de interrupciones, el mejor funcionamiento se logra efectuando la predicción de atenuación a partir únicamente de las dos últimas muestras y añadiendo un margen contra el centelleo de 0,5 dB. Es evidente que, por el contrario, si se reduce el número de muestras previas utilizadas para la predicción, aumenta el tiempo de utilización de las medidas contra el desvanecimiento ya que puede producirse un número mayor de falsas alarmas. El factor U aumenta hasta 1,2, aproximadamente, lo que significa que el tiempo de utilización de las medidas contra el desvanecimiento es más del doble del tiempo de utilización total en el caso ideal. Si la capacidad de reserva disponible es pequeña y es compartida entre numerosas estaciones terrenas, puede ser conveniente aplicar el algoritmo que mejora la eficacia del sistema, aún cuando aumente el número de interrupciones breves durante el tiempo de establecimiento. Los largos tiempos de utilización de las medidas contra el desvanecimiento también se deben al gran valor del ciclo de histéresis H (0,7 dB) y del retardo T_b (20 s) introducido en el procedimiento para restablecer las condiciones de transmisión normales. En la Fig. 10 aparecen los resultados de las simulaciones llevadas a cabo para evaluar el efecto que produce disminuir el retardo T_b , fijado inicialmente en 20 s. El algoritmo de predicción se ha realizado utilizando únicamente las últimas dos muestras y considerando un margen contra fluctuaciones de 0,5 dB y un ciclo de histéresis $H = 0,2$ dB. Puede observarse que este valor de la histéresis y un retardo T_b igual a 10 s son suficientes para contrarrestar de manera eficaz las fluctuaciones rápidas, disminuyendo el factor U de 1,2 a 0,8.

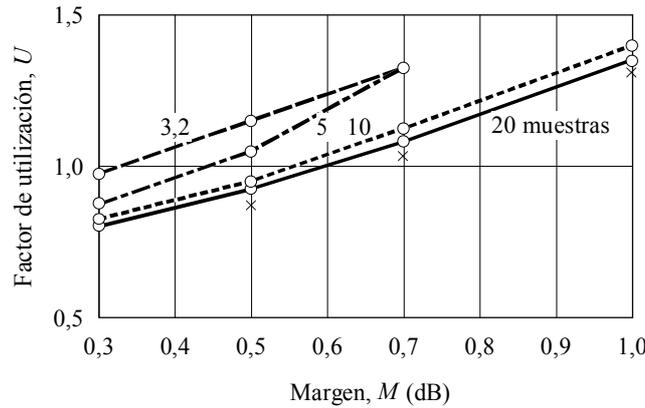
FIGURA 8

Porcentaje de interrupciones registradas durante el tiempo de establecimiento en función del margen de anticipación



Los puntos señalados con x muestran los resultados cuando se aplica un algoritmo de umbral fijo. Otras curvas muestran los resultados cuando se aplica un algoritmo de predicción lineal, con el número indicado de muestras previas.

FIGURA 9
Factor de utilización U en función del margen de anticipación

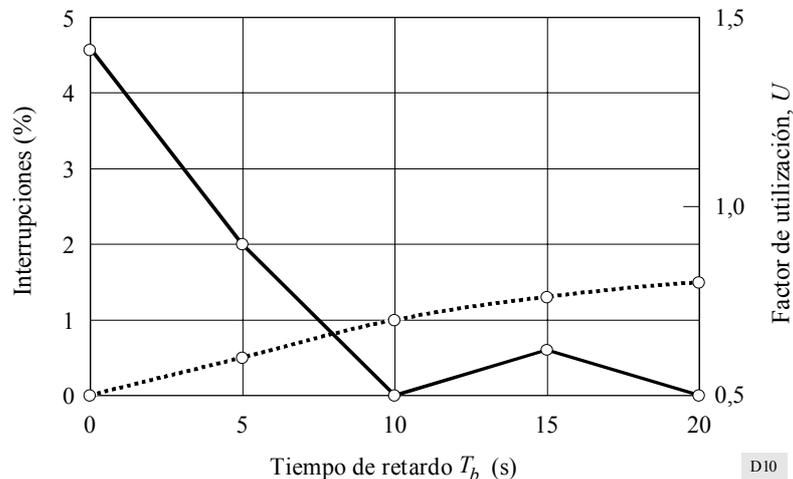


Los puntos señalados con x muestran los resultados cuando se aplica un algoritmo de umbral fijo. Otras curvas muestran los resultados cuando se aplica un algoritmo de predicción lineal, con el número indicado de muestras previas.

D09

Los resultados de la simulación demuestran que la naturaleza de la evolución temporal de la atenuación durante la lluvia es tal que es difícil idear métodos de predicción adecuados. La técnica más sencilla y eficaz parece ser establecer un margen de anticipación fijo de amplitud adecuada. Los algoritmos de predicción examinados en este documento no pueden mejorar significativamente el funcionamiento global (medido por el número de interrupciones y por el factor de utilización) en comparación con el que se obtiene utilizando el margen de anticipación fijo. En cualquier caso, siempre es posible llegar a una solución de compromiso entre el número de interrupciones (es decir, la calidad) y el valor del factor de utilización (es decir, la disponibilidad). Evidentemente, este compromiso depende de los requisitos particulares del sistema de comunicaciones.

FIGURA 10
Porcentaje de interrupciones durante el tiempo de establecimiento (línea continua) y factor de utilización U (línea de puntos) en función del retardo de tiempo T_b .
La predicción lineal se basa en las dos últimas muestras y el margen contra las fluctuaciones es 0,5 dB



D10

5.5 Conclusiones

El método de diversidad de frecuencias en doble banda es especialmente eficaz cuando se necesitan niveles bajos de probabilidad de interrupción.

Este método proporciona grandes márgenes de potencia equivalentes con una cantidad limitada de capacidad de reserva disponible. El número de canales de reserva necesarios depende también del grado de correlación del proceso de atenuación con respecto a los diversos emplazamientos de las estaciones.
