

RECOMENDACIÓN UIT-R S.446-4*

Dispersión de la energía de la portadora para los sistemas que emplean modulación angular y señales analógicas o modulación digital en el servicio fijo por satélite

(1966-1974-1978-1992-1993)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que la utilización de técnicas de dispersión de la energía de la portadora en los sistemas del servicio fijo por satélite puede reducir notablemente las interferencias causadas a las estaciones de un servicio de radiocomunicación terrenal que funcione en las mismas bandas de frecuencias;
- b) que en muchos casos la utilización de tales técnicas puede reducir en una medida moderada o sustancial las interferencias entre sistemas del servicio fijo por satélite que funcionen en las mismas bandas de frecuencias, aunque es posible que en otros casos la utilización de tales técnicas no reduzca las interferencias entre esos sistemas;
- c) que estas técnicas se utilizan corrientemente con éxito en los sistemas del servicio fijo por satélite sin degradación notable en la calidad de su funcionamiento;
- d) que la Recomendación N.º 103 relativa a la dispersión de la energía de la portadora en los sistemas de servicio fijo por satélite se adoptó en la Conferencia Administrativa Mundial de Telecomunicaciones Espaciales (Ginebra, 1979);
- e) que la evaluación de los parámetros de las diversas técnicas de dispersión de la señal de TV/MF figura en el Anexo 1 a la Recomendación UIT-R S.671,

recomienda

- 1** que los sistemas del servicio fijo por satélite utilicen técnicas de dispersión de energía de la portadora en la mayor medida posible y de una manera compatible con el funcionamiento satisfactorio de estos sistemas, con el objeto de distribuir la energía de manera tal que la interferencia producida a las estaciones de un servicio terrenal explotado en las mismas bandas de frecuencias se mantenga, en todo momento, dentro de límites admisibles especificados;
- 2** que en el diseño de los sistemas por satélite se prevea con capacidad para utilizar la técnica de dispersión de la energía de la portadora en el mayor grado posible, a fin de que la misma pueda aplicarse en el momento oportuno para mantener un nivel reducido de interferencia entre los sistemas del servicio fijo por satélite que funcionen en las mismas bandas de frecuencias;
- 3** que la siguiente Nota se considere parte integrante de la Recomendación:

NOTA 1 – En el Anexo 1 se describen diversas técnicas de dispersión aplicables a señales analógicas con modulación de frecuencia y a señales digitales con modulación por desplazamiento de fase que pueden recomendarse para uso práctico.

* 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).

ANEXO 1

Dispersión de energía en el servicio fijo por satélite**1 Introducción**

De los estudios de compartición de bandas de frecuencias entre el servicio fijo por satélite y sistemas de relevadores radioeléctricos, y entre diferentes redes del servicio fijo por satélite se desprende claramente que, para mantener en un nivel admisible las interferencias mutuas entre estos sistemas, será indispensable, en la mayoría de los casos, utilizar técnicas de dispersión de energía con el fin de reducir la densidad espectral de energía de las transmisiones del servicio fijo por satélite durante los periodos de poca carga. La reducción de la densidad máxima de energía también facilitará:

- la utilización eficaz de la órbita de los satélites geoestacionarios mediante la reducción al mínimo de la separación orbital necesaria entre satélites que utilizan la misma banda de frecuencias, y
- el funcionamiento de varias portadoras en los transpondedores de banda ancha.

Es indiscutible que la importancia de la dispersión de energía requerida depende de las características del sistema en cada caso particular. No obstante, también es evidente que la densidad máxima de energía, en condiciones de poca carga, debe mantenerse lo más próxima posible al valor correspondiente a la hora cargada.

En el presente Anexo se exponen los resultados de algunos estudios teóricos y experimentales sobre las técnicas de dispersión de energía aplicables a sistemas de radiocomunicación por satélite que utilizan, respectivamente, modulación de frecuencia del tipo analógico y modulación digital.

Se ha llegado a la conclusión de que puede obtenerse una dispersión de energía substancial en la mayoría de los casos. Sin embargo, existen algunas limitaciones posibles a la eficacia de las técnicas de dispersión, que se exponen en este Anexo.

2 Dispersión de la energía para sistemas analógicos de telefonía multicanal con modulación de frecuencia

Cuando se estudian los métodos que permiten obtener grados elevados de dispersión de energía de la portadora, conviene conocer cuál es el efecto de dispersión de la banda de base con carga máxima, a fin de contar así con un valor de referencia para la comparación de los resultados que pueden obtenerse artificialmente. Para la clase general de sistemas de modulación de frecuencia de gran excursión considerados, es decir, los sistemas cuya excursión cuadrática media (r.m.s.) multicanal (δF) rebasa la frecuencia más alta de la banda de base, que a su vez es muy alta con respecto a la frecuencia inferior de la banda de base, es lícito suponer que el espectro de la potencia media, en las condiciones convencionales de carga a la hora cargada tiene forma gaussiana. De ahí que el efecto de dispersión obtenido sea el siguiente:

$$10 \log \left(\frac{\text{energía máxima por 4 kHz}}{\text{energía total}} \right) = 10 \log \frac{0,004}{\sqrt{2\pi} \delta F} = - (28 + 10 \log \delta F) \quad \text{dB}$$

(donde δF está expresada en MHz)

Cuando δF es inferior a la frecuencia de banda de base más elevada, el efecto de dispersión puede calcularse utilizando la información que figura en el Anexo 1 a la Recomendación UIT-R S.675.

Existen varios métodos para mantener un elevado grado de dispersión de energía de la portadora en los sistemas telefónicos, en que la dispersión obtenida es función de la complejidad de los métodos de dispersión y el aumento de la anchura de banda ocupada en radiofrecuencia resultante de la distorsión. Estos métodos se dividen en dos clases generales: uno que consiste en agregar a la señal de entrada una onda de dispersión que no es necesariamente de magnitud constante, y otro que controla efectivamente, además, la sensibilidad de la excursión de frecuencia del modulador de frecuencia. En la Fig. 1 se ilustran distintas combinaciones de estos dos métodos.

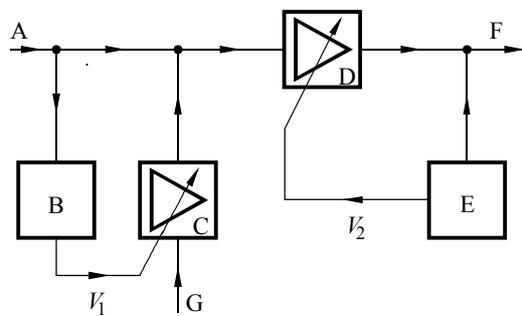
2.1 Dispersión por adición de señales

2.2.1 Método 1a)

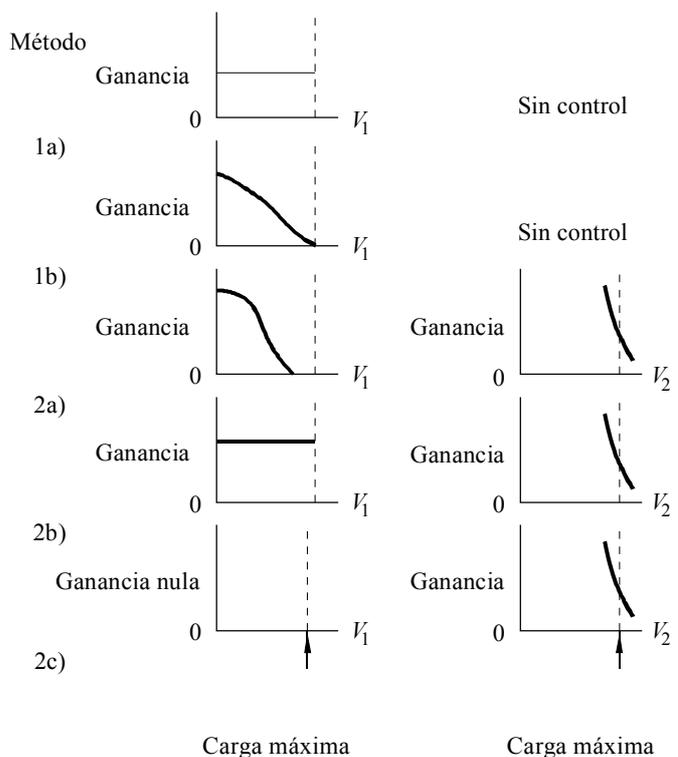
El método más sencillo para introducir cierto grado de dispersión de energía de la portadora es añadir a la señal de banda de base una onda adecuada de dispersión de baja frecuencia de amplitud fija, como indica el método 1a) de la Fig. 1. De las distintas señales de dispersión propuestas en el presente Anexo se examinan las siguientes:

- una señal sinusoidal (Curva A de la Fig. 2);
- una señal sinusoidal, a la que se agrega el 30% del tercer armónico, en fase adecuada (Curva B de la Fig. 2);
- una banda de ruido de baja frecuencia (Curva C de la Fig. 2);
- una onda triangular de baja frecuencia (Curva D de la Fig. 2).

FIGURA 1
Esquema simplificado



A: Señal de banda de base de entrada
 B: Detector de valores medios cuadráticos (r.m.s.)
 C: Amplificador 1
 D: Amplificador 2
 E: Detector de valores medios cuadráticos
 F: Salida hacia el modulador de frecuencia
 G: Señal de dispersión



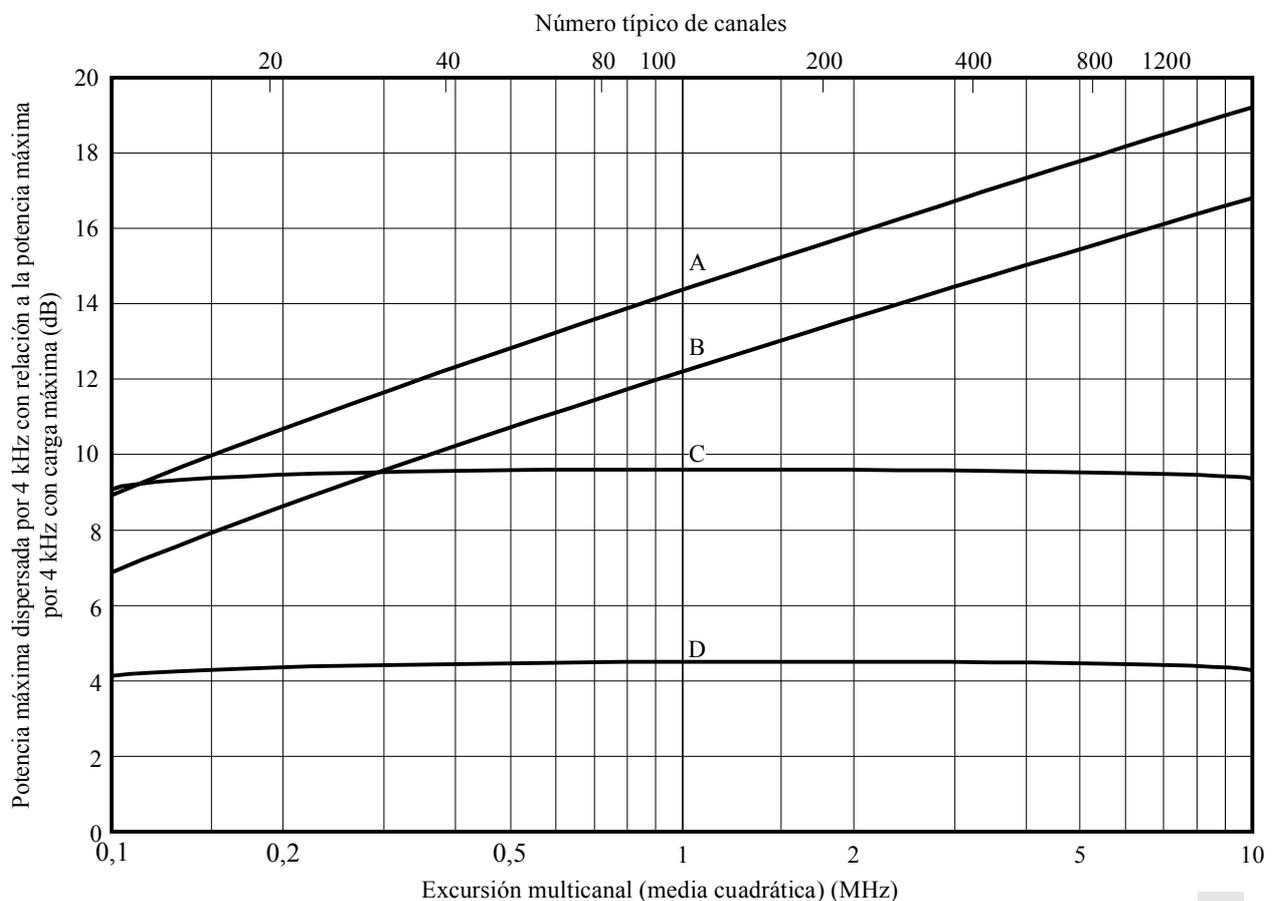
(Se han omitido los filtros, los amplificadores separadores y los pilotos de regulación de ganancia)

Con el fin de obtener una base de comparación entre los rendimientos de estas diversas ondas, se ha calculado la densidad espectral de energía máxima que producen cuando se aplican a una portadora no modulada, admitiendo un aumento del 10% de la anchura de banda ocupada en radiofrecuencia. Los resultados se han llevado a la Fig. 2, la cual muestra lo que ocurriría en condiciones de carga de la hora cargada; las curvas de la Fig. 2 se han designado de A a D, como ya se ha indicado. No obstante se ha efectuado una cierta aproximación como consecuencia de la difícil cuestión que plantea la relación entre la distorsión de la señal y la limitación de la anchura de banda en radiofrecuencia; la cuestión se ha evitado admitiendo:

- que la ocupación total de la anchura de banda sigue la ley de Carson (con una relación valor de cresta/valor cuadrático medio (r.m.s.) igual a 12 dB);
- que esta fórmula relativa a la anchura de banda puede también aplicarse a la suma del valor de la señal y del valor r.m.s. de la excursión de frecuencia debido a la dispersión, cuando ésta se hace mediante una banda de ruido;
- que, en los demás casos, a la anchura de banda ocupada en radiofrecuencia viene a agregarse la excursión cresta a cresta de la onda de dispersión.

No se cree que los errores así introducidos sean importantes; en todo caso, deben producirse en el mismo sentido para los distintos tipos de onda. Para mayor aproximación cada tipo de onda de dispersión está representado en la Fig. 2 por una sola curva.

FIGURA 2
Dispersión de energía en sistemas de telefonía multicanal



2.1.1.1 Dispersión sinusoidal

Según la Curva A de la Fig. 2, es indiscutible que la dispersión de energía de la portadora producida por una señal sinusoidal es bastante ineficaz, mientras que la Curva B indica que la mejora que se obtiene con una señal sinusoidal a la que se agregue un 30% del tercer armónico sólo es de 2 dB. Para la transmisión clásica de 20 canales, la densidad máxima de potencia, en ambos casos, es unos 10 dB superior al valor registrado en condiciones de carga máxima. Es éste un rasgo característico de estos tipos de dispersión: la cantidad cuya densidad de potencia dispersada excede de la densidad con carga máxima, aumenta con el valor cuadrático medio de la excursión de frecuencia en funcionamiento multicanal y, por consiguiente, con la capacidad en canales. Por ejemplo, para 1 200 canales, el exceso es de unos 18 dB.

2.1.1.2 Dispersión triangular

Para un aumento dado de la anchura de banda ocupada, el método que asegura con mayor eficacia la dispersión de la energía de una sola raya espectral es, por lo menos teóricamente, la señal triangular. La densidad de potencia dispersada es inversamente proporcional al porcentaje de aumento admisible para la anchura de banda de radiofrecuencia. La Curva D de la Fig. 2 muestra que, si se permite un aumento de un 10% de la anchura de banda ocupada, la potencia dispersada por banda de 4 kHz es unos 4,5 dB superior a la potencia correspondiente a las condiciones de carga máxima, para la mayor parte de los números de canales.

Cuando se utilizan técnicas de dispersión mediante ondas triangulares de baja frecuencia (≤ 1 kHz) en sistemas multicanales, un sistema deseado de un solo canal por portadora puede estar expuesto a la casi totalidad de la potencia de una portadora interferente durante periodos de tiempo considerables.

La señal triangular ofrece evidentemente un medio sencillo y eficaz de dispersar la energía presente en las rayas espectrales aisladas de las transmisiones telefónicas. Sin embargo, no hay que olvidar que su eficacia depende de que la forma de la onda se mantenga fielmente hasta que aparezca como una modulación de frecuencia, sobre todo cuando se requiere un grado elevado de dispersión. Por ejemplo, si para la transmisión de 1 200 canales se necesitan 32 dB de dispersión, un aplanamiento de sólo 0,25% de los extremos de la onda duplicaría localmente la densidad espectral de energía.

Antes de aplicar la señal triangular hay que filtrarla, para evitar que los armónicos de la frecuencia fundamental perturben los canales bajos del multiplex telefónico. Con frecuencias de la onda triangular inferiores o iguales a 150 Hz, y con una frecuencia baja de la banda de base multicanal igual a 4 kHz, el filtrado entraña una deformación de los ángulos de la señal y, por consiguiente, de las crestas de densidad de energía en los extremos del espectro de modulación en caso de carga débil.

En el Cuadro 1 se recogen los valores medidos del aumento de la densidad de energía en los extremos del espectro con relación a la densidad en la frecuencia central del espectro en un multiplex de 132 canales, en función de la frecuencia de la onda triangular. En este sistema se utilizaba una regulación discontinua de un solo escalón.

CUADRO 1

Frecuencia de la onda triangular (Hz)	Aumento de la densidad de energía (dB)
20	3
80	5
150	7

El filtro de paso bajo utilizado era del tipo Chebyshev de 7 polos con una frecuencia de corte de 2,7 kHz y cuya atenuación en 4 kHz era igual a 34 dB.

En cambio, se puede tener en cuenta la presencia de la onda piloto de continuidad en la entrada del modulador, a condición de que sea generada independientemente del múltiplex telefónico. En las mismas condiciones de medida que las indicadas anteriormente, la aplicación de una onda piloto a un nivel de -20 dBm0 permite disminuir de 7 a 3 dB el aumento de las crestas de densidad de energía en los extremos de la banda.

2.1.1.3 Dispersión mediante una banda de ruido de baja frecuencia

Añadiendo una banda de ruido de baja frecuencia a la banda de base multicanal, se obtiene una forma de dispersión de energía de la portadora, cuya introducción no es crítica y, al igual que la dispersión triangular, tiene la propiedad de producir una densidad espectral de energía máxima inversamente proporcional a la amplitud de la señal. La Curva C de la Fig. 2 muestra que, para un aumento del 10% de la anchura de banda ocupada, la potencia máxima dispersada por banda de 4 kHz es unos 9,5 dB mayor que el valor en condiciones de carga máxima, con independencia del número de canales.

NOTA 1 – Cuando no se fija el nivel de la señal de distorsión, el grado requerido de dispersión puede obtenerse por otros métodos.

2.1.2 Método 1b)

Una variante obvia del método 1a) comprendería un mecanismo para ajustar automáticamente el grado de dispersión artificial de energía en función de la carga del sistema (véase el método 1b) de la Fig. 1). En efecto, utilizando, la dispersión por banda de ruido de esta forma, la densidad espectral de energía máxima podría mantenerse muy cerca del valor de las condiciones de carga máxima sin aumentar la anchura de banda ocupada en radiofrecuencia. El resultado que en la práctica pueda obtenerse dependerá de la distorsión que produzca la interacción (por limitación de la anchura de banda en radiofrecuencia y por otras características de transmisión) entre la señal de dispersión, los tonos aislados y los canales telefónicos activos en condiciones de carga reducida. Es probable que el problema sólo pueda resolverse experimentalmente, pues todavía no existe ningún método generalmente aceptado para calcular la distorsión de las señales moduladas en frecuencia durante la transmisión, incluso para el simple caso de carga de ruido blanco.

Un método propuesto para aplicar los distintos grados de dispersión, objeto del presente punto, consiste en introducir conversación simulada (es decir, ruido de anchura de banda limitada) en una proporción adecuada de los canales telefónicos inactivos. Aunque de esa forma podría mantenerse la dispersión total sin aumentar la anchura de banda, la complejidad del equipo que probablemente se necesitaría, constituye una gran desventaja, pues habría que aplicarlo a los cuadros de conmutación en audiofrecuencia en que tiene su origen la banda de base.

2.2 Dispersión por control automático de la excursión de frecuencia

2.2.1 Consideraciones generales

No hay duda de que el nivel de la señal que llega al modulador de frecuencia podría ajustarse para mantener en un nivel constante el valor cuadrático medio (o la cresta) de la excursión de frecuencia. El nivel deseado podría obtenerse sometiendo simplemente la banda de base, sea cual fuere su contenido, a una amplificación adecuada, o amplificándola después de introducir cierto valor fijo o variable de dispersión artificial. La atenuación global de transmisión de la banda de base del sistema se mantendrá suficientemente constante compensando la ganancia después de la demodulación mediante una frecuencia pura proveniente de una señal piloto. A continuación se analizan las distintas posibilidades.

2.2.2 Método 2a)

De los métodos de dispersión de energía portadora, el más general es el método 2a) de la Fig. 1, del cual se derivan, hasta cierto punto, los demás. Consiste en superponer en la banda de base, antes de aplicar el control automático de excursión de frecuencia, una fuente de dispersión artificial de energía cuya amplitud es función de las condiciones de carga. El uso de este método modifica, o aumenta muy poco, la anchura de banda ocupada en radiofrecuencia. Además, retrasando la aplicación de la dispersión artificial hasta casi obtener las condiciones de carga reducida, es posible que se lograra disminuir notablemente la sensibilidad del sistema al ruido térmico, a la distorsión y a la interferencia. La importancia de esta disminución dependerá de la fracción de potencia de la banda de base con carga máxima que se atribuyese a las señales telefónicas. En cuanto al método 1b), convendría también determinar la distorsión de la banda de base con él asociada, aun cuando, en igualdad de condiciones, tal distorsión sería menor que con el primer método porque la mayor excursión de frecuencia por canal, en condiciones de carga reducida, haría menos sensible el sistema a los componentes de distorsión producidas en radiofrecuencia.

En lo que respecta a la elección del medio de introducir una dispersión artificial en la banda de base, podrá utilizarse cualquiera de las ondas de dispersión de baja frecuencia consideradas en el § 2. La banda de ruido semejante a uno o varios canales telefónicos constantemente activos merece quizá la preferencia por ser razonablemente eficaz, porque produce la misma dispersión para una excursión media cuadrática determinada que la banda de base. Ello permite un control preciso de la excursión mediante un sencillo detector de valores cuadráticos medios y no ofrece dificultades de aplicación con grandes amplitudes.

2.2.3 Método 2b)

No es más que una simplificación del método anterior; permite mantener en un valor fijo la amplitud de la señal de dispersión introducida. Aumentaría algo la anchura de banda ocupada en radiofrecuencia, pero no tanto como con el método 1a) para el mismo grado de dispersión.

2.2.4 Método 2c)

La ausencia completa de una señal de dispersión artificial en la señal de modulación reduciría la dispersión por control automático de la excursión de frecuencia a su forma más simple. Al parecer, la eficacia del método depende del grado moderado de complejidad que comporta el espectro de la banda de base, incluso con carga reducida. Desgraciadamente, no es posible contar con ello: en ausencia completa de toda actividad del canal telefónico, la carga del sistema degeneraría en cierto número de frecuencias piloto, residuos de portadora y otros elementos de esta índole. Pueden existir suficientes señales como éstas en un sistema de gran capacidad para producir en la banda de base algo semejante a una potencia uniformemente distribuida, pero no es probable que ocurra lo mismo en los sistemas de poca capacidad, cuyos niveles de carga más bajos podrían deberse a un número muy pequeño de señales piloto predominantes, especialmente si en un nivel excepcionalmente bajo hay muchos residuos de portadora.

Si la carga de un sistema sólo está constituida por una o dos señales predominantes en la banda de base, es posible demostrar que las densidades espectrales en radiofrecuencia pueden ser muchos decibelios superiores a las que se obtienen en condiciones de carga máxima. Por consiguiente, no sería razonable confiar en la presencia de algunas frecuencias para obtener, mediante el control automático de excursión de frecuencia exclusivamente, un grado de dispersión de energía similar al que se obtiene con carga máxima.

2.3 Resumen

Si se consideran los métodos de aplicación de la señal de dispersión, se comprueba que el empleo del método 1a) causaría un aumento excesivo de la anchura de banda ocupada, en el caso de querer aproximarse a las condiciones de carga de las horas cargadas. De ahí que el método 1b), que comprende medios para ajustar automáticamente el grado de dispersión según la carga del sistema, sea el que ofrece posibilidades más interesantes.

El método 2 es más complicado que el método 1, pero convierte en ventaja la necesidad de realizar una dispersión de energía al mejorar las características de ruido del sistema cuando, en condiciones de poca carga, aumenta la sensibilidad de la excursión de frecuencia. El inconveniente manifiesto de este método es que requiere la regulación global de la ganancia, mientras que la mejora que se obtendría en condiciones de poca carga depende del tráfico fuera de las horas cargadas. De las variaciones del método 2 examinadas en el § 2.1, parece que el método 2a) es el más adecuado para una aplicación generalizada.

Cuando se empleen métodos que impliquen una rápida variación en la cuantía de la dispersión introducida cuando varía la carga, se ha de prestar una atención cuidadosa a la elección del intervalo de tiempo entre la variación de la carga y el instante de proceder a la conmutación de la dispersión.

Al considerar la magnitud de la dispersión que puede obtenerse en la práctica ha de tenerse en cuenta que las condiciones de carga máxima no proporcionan necesariamente el grado de dispersión postulado por la distribución gaussiana. No sería prudente suponer que se logra esta condición ideal en la práctica hasta tener pruebas en que apoyarse. Mediciones efectuadas con una carga de ruido blanco han demostrado que los sistemas que emplean una señal de dispersión triangular pueden mantener la dispersión de energía de la portadora dentro de los límites de 2 dB, cuando se simulan las condiciones de carga de la hora cargada. No se conoce aún el grado de aproximación a estas condiciones que se conseguirá en la práctica, pero sería poco prudente suponer que se conseguirá dispersar la energía a menos de 3 dB del valor correspondiente a las condiciones de carga de la hora cargada sin aumentar la anchura de banda en radiofrecuencia.

3 Métodos de dispersión de la energía aplicables a las señales de televisión analógicas con modulación de frecuencia

3.1 Introducción

En un sistema de transmisión de televisión con modulación de frecuencia, gran parte de la potencia radiada se puede concentrar en la frecuencia portadora, o cerca de ella, en determinadas condiciones de modulación, por ejemplo, cuando se transmite una imagen de televisión con grandes zonas de igual brillo. La dispersión de la energía puede obtenerse añadiendo a la señal de vídeo, antes de la modulación, una señal adecuada de baja frecuencia.

Con el fin de obtener información sobre la degradación que puede producir la utilización de esta técnica de dispersión de la energía, se ha realizado un estudio experimental para determinar los efectos subjetivos que en las señales de televisión en blanco y negro de 625 líneas causan la adición y supresión, por diversos métodos, de distintas señales de baja frecuencia adecuadas para la dispersión de la energía.

Para determinar el efecto de dispersión que produce este método, a título de ejemplo, se supondrá que la calidad global de funcionamiento del sistema limita la amplitud cresta a cresta de la señal de dispersión al 30% de la amplitud cresta a cresta de la señal de vídeo. Considerando un sistema de 625 líneas que emplee la red normal de preacentuación (Recomendación UIT-R F.405), la

excursión de frecuencia cresta a cresta de la onda de dispersión será igual al 9,4% de la excursión cresta a cresta de la señal de vídeo sin preacentuación. Utilizando el símbolo ΔF (MHz) para esta excursión de frecuencia de la señal de vídeo, la dispersión que se obtiene es aproximadamente:

$$10 \log \left(\frac{\text{energía máxima por 4 kHz}}{\text{energía total}} \right) = 10 \log \frac{0,004}{0,094 \Delta F} = - (14 + 10 \log \Delta F) \quad \text{dB}$$

A título de comparación, la dispersión teórica obtenida en telefonía, suponiendo una distribución espectral gaussiana y una relación valor de cresta/valor cuadrático medio de 12 dB (véase el § 2.1.1), será:

$$- \left(28 + 10 \log \frac{\Delta F}{8} \right) = - (19 + 10 \log \Delta F) \quad \text{dB}$$

lo cual significa que, en el caso de la televisión, el valor de la dispersión será unos 5 dB inferior al óptimo con un 10%, aproximadamente, de aumento de la anchura de banda en radiofrecuencia.

Para economizar anchura de banda convendría controlar la excursión de frecuencia según el método 1b) descrito en el § 2.1. Esto no puede hacerse con cualquier método sencillo pues seguramente habría que controlar la concentración de la energía en el espectro de radiofrecuencia.

Además de los métodos de dispersión de energía examinados anteriormente, se incluye la descripción de otros dos sistemas en los § 3.5 y 3.6. En el primero de estos puntos se describe la dispersión por transformación de la señal vídeo, mientras que en el segundo se describen las técnicas de dispersión utilizadas para proteger las transmisiones telefónicas de un solo canal por portadora en las que la frecuencia de la señal dispersada es la frecuencia de línea de televisión. El § 3.6 describe también una técnica de dispersión de energía compuesta, en la cual la señal de dispersión se compone de una forma de onda triangular a la frecuencia de cuadro y de una forma de onda triangular o sinusoidal de frecuencia igual a la mitad de la frecuencia de línea. Esta técnica puede utilizarse para reducir los efectos de la interferencia causada en los sistemas telefónicos MDF y en las portadoras SCPC.

3.2 Señal de dispersión

La amplitud y la forma de la señal de dispersión que se añade a la señal de vídeo antes de la modulación, deben producir el grado requerido de dispersión de energía de la portadora sin introducir una degradación apreciable en las características de transmisión del sistema. Esta última condición depende también de la eficacia del método que se utilice para suprimir la señal agregada, y de la linealidad global del sistema de transmisión. Para determinar la señal preferida, se han considerado con bastante detalle dos formas de onda triangular (la triangular «simétrica» y la de «diente de sierra») con frecuencias de repetición centradas en aproximadamente 50, 25 y 12,5 Hz.

Se consideró que el resultado más favorable se obtendría sincronizando la señal de dispersión con la frecuencia de trama de la señal de televisión, y que la puesta en fase relativa de las señales sincronizadas podría, en ciertos casos, introducir variaciones en la degradación de la imagen. Se estudiaron estos efectos utilizando ambas señales de dispersión sincronizadas y no sincronizadas; en lo que respecta a la deterioración de la imagen recibida, los experimentos demostraron que es mucho más ventajoso utilizar señales sincronizadas que señales no sincronizadas. Como la generación de señales sincronizadas con la frecuencia de trama de televisión no presenta en la práctica ningún problema, los demás experimentos se circunscribieron a señales sincronizadas.

El procedimiento de sincronización debe normalmente asegurar la puesta en fase correcta de estas señales con la señal de trama de televisión. Con las señales en diente de sierra de 50, 25 y 12,5 Hz y con las simétricas de 25 y 12,5 Hz, todos los puntos de inflexión se producen durante el intervalo de supresión de trama, y las discontinuidades en la pendiente de la señal no se traducen en

deterioraciones de la imagen. Con la señal simétrica de 50 Hz, únicamente los puntos alternos de inflexión pueden coincidir con el intervalo de supresión de trama, y los demás puntos se producen en el centro de cada trama (es decir, a través del centro de la imagen).

Se creyó que, para la dispersión de la energía, sería probablemente necesario un nivel cresta a cresta de la señal de dispersión del 10% al 50% de la amplitud cresta a cresta de la señal de vídeo antes de la preacentuación y las pruebas se limitaron a esta gama de niveles.

Se ha descrito un método para aumentar el nivel de la dispersión sin aumentar, al propio tiempo, la excursión de frecuencia de cresta. En este método se propone someter los picos que se forman en los bordes del impulso de la señal de vídeo, como resultado del paso por el circuito normal de preacentuación, a un proceso no lineal previo a la modulación. Este proceso reduce la amplitud cresta a cresta de la señal de vídeo, proporcionando por consiguiente la posibilidad de aumentar la dispersión en la anchura de banda original del sistema.

Otro factor que hay que tener en cuenta al diseñar los sistemas de dispersión de energía es la presencia probable de dispersión «natural» provocada por imperfecciones de los componentes del sistema. Por ejemplo, los sistemas que contienen convertidores elevadores de frecuencia pueden introducir un nivel significativo de dispersión como resultado de «temblores» («jitter») en los osciladores de estos equipos. Se requieren nuevos estudios para determinar la posible contribución de la dispersión «natural» a los problemas de coordinación, sin introducir al propio tiempo una reducción inadmisibles de la calidad de funcionamiento del sistema con dispersión.

3.3 Linealidad del canal de transmisión

Cuando el canal de transmisión presenta características no lineales, pueden producirse fenómenos de intermodulación entre la señal de dispersión y la señal de vídeo. En tal caso, pueden aparecer defectos molestos en la imagen de televisión, particularmente en la imagen en color. Por ejemplo, pruebas hechas con el sistema PAL y una señal de dispersión triangular simétrica a 50 Hz (sincronizada con la exploración de trama) y unos 0,5 V cresta a cresta medida antes de la preacentuación en un punto en el que la señal de vídeo tiene el nivel nominal de referencia (véase la Recomendación UIT-R F.270), han demostrado que la imagen poseía un índice de calidad subjetiva igual a 3 en la escala de degradación de seis notas en las siguientes condiciones:

- fase diferencial 8°
- ganancia diferencial 10%
- no linealidad a corto plazo 10%.

Parece conveniente proseguir los estudios al respecto, a fin de determinar el límite admisible de la no linealidad para los distintos sistemas de televisión en un enlace de televisión por satélite que emplee la dispersión de energía.

3.4 Supresión de la señal de dispersión

En la estación terrena receptora hay que eliminar de la señal de la banda de base la señal de dispersión; a tal fin se han propuesto los dos métodos siguientes.

3.4.1 Anulación de la señal de dispersión

La señal de dispersión puede eliminarse de la señal de la banda de base por «anulación» mediante otra señal de dispersión, generada localmente e introducida en contrafase con la primera. Puede resultar útil transmitir la señal de dispersión por un canal secundario y disponer así de otro medio para reproducir localmente la señal.

Existen dos métodos posibles de anulación: en el primero la señal de dispersión puede inyectarse con fase opuesta después de la demodulación, mientras que, en el segundo, el oscilador local del receptor de la estación terrena se modula en frecuencia mediante la señal de dispersión de fase opuesta. Este método tiene la ventaja de que, al anularse la energía de dispersión antes de la demodulación de la señal de modulación de frecuencia, no hay que aumentar la anchura de banda en frecuencia intermedia del discriminador. Recientemente se han hecho experimentos que han demostrado que la anulación de la señal seguida de una «fijación» (como se describe en el § 3.4.2) constituye un método eficaz que suprime de la manera más completa la señal de dispersión que cuando se recurre únicamente a una o dos «fijaciones».

3.4.2 Fijación del nivel del negro

Los efectos de la señal de dispersión pueden suprimirse de la señal de la banda de base mediante la conocida técnica aplicada en televisión, denominada «fijación del nivel del negro». Se trata de un dispositivo que se utiliza normalmente para suprimir la distorsión de baja frecuencia en una señal de televisión, mediante muestreo y corrección de errores.

La medida en que puede reducirse una señal de error en baja frecuencia mediante la fijación, depende de la frecuencia de la señal de error y del nivel del ruido aleatorio presente en la señal de vídeo. Como los primeros sistemas de satélites pueden tener que transmitir señales de vídeo con una relación señal/ruido mediocre, en los experimentos se ajustaron las características de los dispositivos de fijación de modo que coincidieran con las características óptimas que puedan obtenerse con sistemas de 625 líneas que funcionan con una relación señal/ruido mediocre. En el Cuadro 2 se indican características típicas para las señales sinusoidales de error.

CUADRO 2

Frecuencia de la señal de error (Hz) (onda sinusoidal)	50	25	12,5
Relación $\frac{\text{Nivel cresta a cresta de la señal de error a la salida}}{\text{Nivel cresta a cresta de la señal de error a la entrada}}$ (dB)	-15	-21	-27

(Conviene hacer observar que, al disminuir la frecuencia de la señal de error, aumenta la eficacia de la fijación y la visibilidad del parpadeo de la imagen. Por consiguiente, desde el punto de vista subjetivo de la deterioración de la imagen, estos dos efectos tienden a anularse.)

El efecto que produce la fijación del nivel del negro a una señal de error de forma triangular es similar al que se obtendría si la señal de error fuese diferencial. Con los niveles que en un sistema real de dispersión de energía pueden necesitarse, un solo dispositivo de fijación del tipo descrito no reduce a un nivel aceptable la deterioración de imagen introducida por cualquiera de las distintas señales consideradas.

Conviene mencionar la principal diferencia entre la señal en «diente de sierra» y las señales «simétricas». Como la pendiente de la primera es constante durante la parte «activa» de cada trama, la única deterioración de imagen que puede observarse en monitores de imagen, después de fijar el nivel del negro de la señal de vídeo, es un ligero y quizá insignificante sombreado a través de la imagen. No obstante, la gran pendiente de la señal de dispersión, durante el intervalo de supresión de trama, produce en la señal una fuerte distorsión cuya magnitud depende del valor que tenga la señal de dispersión utilizada. Esta distorsión es muy perjudicial en la práctica, porque puede interferir con las señales de sincronización y con las de prueba de intervalo vertical durante el intervalo de supresión de trama, y este tipo de distorsión es extremadamente difícil de suprimir una vez introducido en la señal de vídeo.

Con la señal «simétrica», el defecto residual de una sola operación de «fijación del nivel del negro» se manifiesta por una deterioración de la imagen. En el caso de una señal de 50 Hz, el defecto aparece como una perturbación a través del centro de la imagen, y en el de las señales de 25 y 12,5 Hz se observa parpadeo. Este efecto depende también del nivel de la señal de dispersión utilizada, pero aplicando una nueva fijación se reduce el parpadeo a un nivel imperceptible, incluso con una señal de dispersión cuya amplitud sea igual al 50% de la amplitud cresta a cresta de la señal de vídeo.

Aunque las características de la distorsión de la señal son algo distintas después de dos «fijaciones del nivel del negro», la magnitud de la dispersión residual es unos 10 a 20 dB menor con una señal de dispersión simétrica que con una señal en «diente de sierra».

3.4.3 Realimentación de frecuencia

La señal de dispersión se puede eliminar utilizando técnicas de realimentación de frecuencia de banda estrecha, que se aplican al paso de frecuencia intermedia del receptor. La ventaja de este método es que permite reducir la anchura de banda efectiva del receptor, con la consiguiente mejora del umbral de ruido del mismo.

En una aplicación particular del principio arriba mencionado, se ha elegido una señal de dispersión de 2,5 Hz. En el receptor, se elimina esta señal por medio de un circuito de realimentación negativa provisto de un filtro de baja frecuencia con una frecuencia de corte inferior a la frecuencia más baja de la señal de vídeo. La excursión de frecuencia producida por la señal de dispersión se reduce así en una magnitud que depende del grado de realimentación empleado, pudiéndose alcanzar fácilmente una reducción de 15 dB, sin afectar la amplitud de la señal de vídeo.

3.5 Dispersión por transformación de la señal de vídeo

Aplicando una modulación angular a la señal de televisión, puede asegurarse la dispersión de la energía de la portadora invirtiendo la polaridad de la señal de vídeo, línea por línea, y sustituyendo los impulsos de sincronismo de línea y de trama por ráfagas de oscilaciones sinusoidales. El periodo de cada ráfaga es igual al del impulso de sincronismo correspondiente, y la amplitud cresta a cresta de la oscilación sinusoidal es idéntica a la de una señal de vídeo.

3.6 Señal de dispersión de energía a la frecuencia de línea

Antes de leer el texto que sigue debe señalarse que la utilización de dispersión de energía en la frecuencia de línea exige estudios adicionales en lo que respecta al comportamiento global de la cadena de TV para formatos analógicos compuestos convencionales y a la influencia sobre formatos cifrados o de componentes analógicos.

La forma de onda de la señal de dispersión de energía usualmente adoptada para sistemas de televisión, una onda triangular con una frecuencia equivalente a la mitad de la frecuencia de trama, es ineficaz para proteger las transmisiones de un solo canal por portadora (SCPC). Ello se debe a que, con la velocidad de barrido de frecuencia resultante, de alrededor de 1 MHz por 1/50 s, el tiempo que permanece la portadora dentro de la banda de paso del receptor SCPC es mucho mayor que el tiempo de respuesta del filtro de FI del receptor. De ello resulta que, periódicamente, el demodulador del receptor SCPC queda plenamente expuesto a la portadora de televisión.

Estudios efectuados en los Estados Unidos de América, en la Federación de Rusia y en Francia indican que hay posibilidades de utilizar la dispersión de energía a la frecuencia de línea de televisión para reducir entre 9 y 10 dB el margen de protección necesario para proteger las emisiones MIC-MDP-SCPC contra las portadoras de televisión MF, en comparación con la dispersión de energía a la mitad de la frecuencia de trama.

La utilización de una señal de dispersión a la frecuencia de línea producirá un nivel de interferencia en los circuitos de relevadores radioeléctricos terrenales y en los circuitos por satélite con portadoras MDF/MF de bajo índice de modulación, superior a la que produciría una señal de dispersión de baja frecuencia (frecuencia de cuadro o inferior). El efecto de esta degradación adicional dependerá de los parámetros de los sistemas de que se trate, aunque se han observado degradaciones de más de 7 dB.

En vista de la posible interferencia causada por las señales de televisión MF en los sistemas SCPC y en sistemas terrenales de relevadores radioeléctricos, podría ser ventajoso utilizar una señal compuesta de dispersión con señales componentes lentas (por ejemplo, a la frecuencia de trama) y rápidas (por ejemplo, a la frecuencia de línea).

Estudios analíticos, así como mediciones recientes, han mostrado que de hecho, una señal de dispersión mixta puede dar lugar a requisitos menos exigentes en términos de C/I en comparación con los que se obtienen utilizando solamente una señal de dispersión en la frecuencia de línea.

Medidas realizadas utilizando ondas sinusoidales y triangulares como componentes de una señal de dispersión rápida indican que los sistemas de dispersión mixta basados en cualquiera de los dos tipos de ondas mencionadas presentan características semejantes.

La utilización de una sinusoidal presenta, no obstante, ventajas sobre la utilización de una onda triangular debido a que la cancelación de la onda sinusoidal puede resultar mucho más fácil de realizar que la de una onda triangular. Por tanto, incluso utilizando equipos sencillos para receptores domésticos disponibles en el mercado a bajo precio, se obtendrán bajos valores de potencia de la señal de dispersión de energía residual de ruido, siendo la degradación de la calidad de la señal de televisión prácticamente insignificante.

Por tanto, parece viable la adopción de un método de dispersión de energía compuesto, en el que la relación $\Delta f_{1/2H}/\Delta f_T$ esté comprendida entre 0,75 y 1. Las medidas realizadas han demostrado que el valor de cresta de la densidad espectral de la señal TV-MF no aumenta si se utiliza este método en lugar de otros métodos de dispersión de energía. De esta forma las portadoras TV-MF pueden cumplir los límites de densidad de flujo de potencia del Reglamento de Radiocomunicaciones. Se requieren más estudios orientados a realizar una evaluación cuantitativa de la complejidad adicional que se introduciría en los receptores y efectuar la evaluación subjetiva de la calidad de la señal de televisión después de eliminar la señal de dispersión de energía.

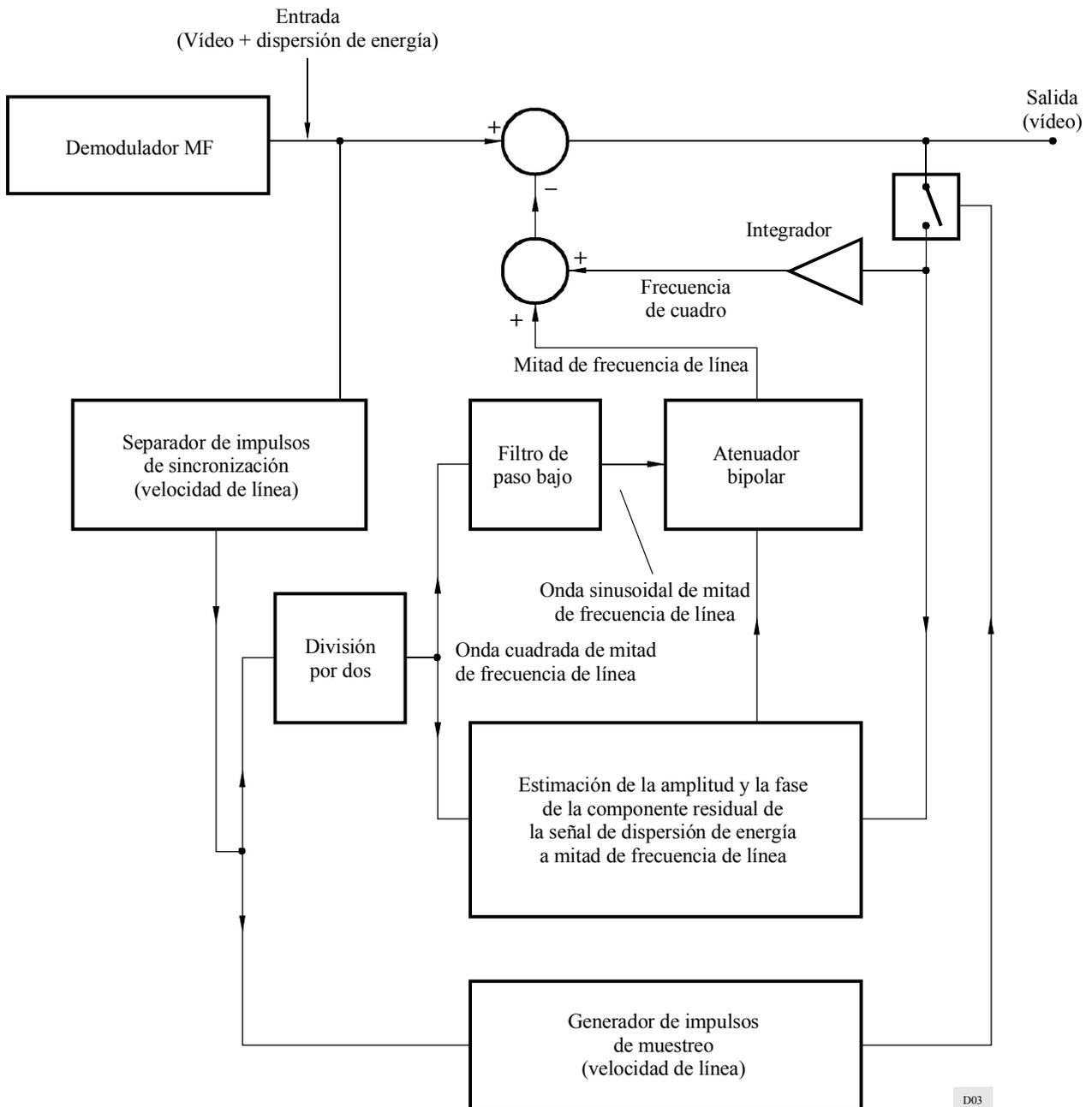
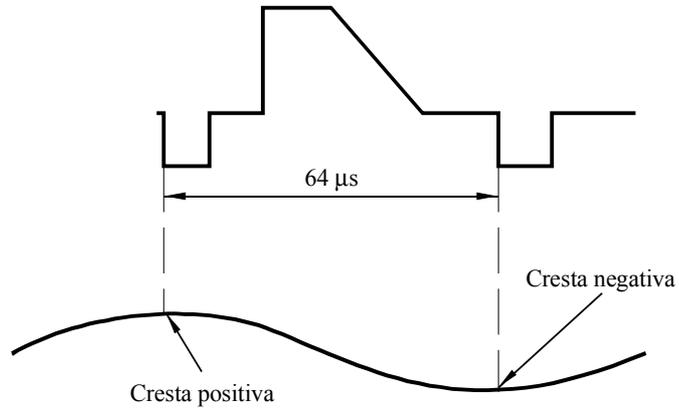
A título ilustrativo, la Fig. 3 muestra un método para la eliminación de la señal compuesta de dispersión de energía, utilizando un sistema de muestreo/integración/retroalimentación convencional, que se alinea sobre el nivel del negro y suprime la dispersión de energía a la frecuencia de trama, completado por un circuito de supresión de energía sinusoidal a la mitad de la frecuencia de línea.

Las crestas de la componente a mitad de frecuencia de línea están dispuestas de manera que caigan en los puntos de impulso de sincronización de línea. El muestreo en estos puntos se utiliza para la comprobación de las dos componentes de la dispersión de energía.

El circuito de eliminación de la componente a la mitad de la frecuencia de línea genera una onda sinusoidal a la mitad de la frecuencia de línea, a partir de los impulsos de sincronización. Su amplitud se controla en un bucle cerrado tratando muestras de la señal de vídeo de salida, de modo que las componentes residuales a la mitad de la frecuencia de línea se lleven a cero. Una ambigüedad de fase de 180° causada por la operación de división por dos se elimina mediante el atenuador bipolar.

FIGURA 3

Ejemplo de un método para eliminar una señal compuesta de dispersión de energía (Frecuencia de cuadro/mitad de frecuencia de línea)



4 Técnicas de dispersión de energía aplicables a señales digitales

4.1 Consideraciones generales

Cuando el tren de impulsos de información presenta una estructura aleatoria, la energía de la portadora en radiofrecuencia estará lo suficientemente dispersa y las emisiones de una estación espacial no producirán crestas de densidad de flujo de potencia en la superficie de la Tierra. Pero, si el tren de impulsos de información incluye una secuencia fija con un régimen periódico de repetición, aparecen algunos componentes en forma de rayas en el espectro de la portadora en RF y, en consecuencia, algunas de las crestas de la densidad de flujo de potencia en la superficie de la Tierra pueden rebasar el límite recomendado por la UIT.

Las técnicas de dispersión de energía que aquí se describen tienen por finalidad reducir las crestas de potencia del espectro; ello se logra produciendo un tren de impulsos de transmisión de forma similar a la de una secuencia aleatoria, cualquiera que sea la secuencia del tren de impulsos de información. En el § 4.3 se describen dos técnicas de dispersión de energía.

4.2 Espectro de las señales digitales con modulación por desplazamiento de fase (MDP)

El espectro de potencia de una portadora modulada por inversiones de fase ideales consiste en «rayas» que, en una secuencia pseudoaleatoria de N símbolos de t segundos por símbolo, están separadas por $1/Nt$ (Hz). El espectro de potencia de esas rayas lo da aproximadamente la siguiente ecuación:

$$W(f) \approx \frac{1}{N} \left\{ \frac{\text{sen } \pi (f - f_c) t}{\pi (f - f_c) t} \right\}^2 \delta \left(f - f_c - \frac{n}{Nt} \right) \quad (1)$$

donde:

- N : longitud de la secuencia pseudoaleatoria (símbolos)
- t : duración de los símbolos (s)
- n : número entero
- f_c : frecuencia de la portadora en RF (Hz)
- δ : función delta.

La raya más ancha corresponde a $n = 1$.

A medida que la longitud de la secuencia se acerca al infinito, es decir, $N \rightarrow \infty$, también $Nt \rightarrow \infty$ y la separación entre las rayas $\rightarrow 0$. En este caso, el espectro de potencia será continuo y, por lo tanto:

$$W(f) = t \left\{ \frac{\text{sen } \pi (f - f_c) t}{\pi (f - f_c) t} \right\}^2 \text{ por Hz} \quad (2)$$

En este caso se observa que la densidad espectral máxima se produce para la frecuencia portadora.

La ecuación (2) da el valor medio del espectro de potencia en el caso ideal de un tren de impulsos aleatorio. En la práctica, la señal de modulación puede estar muy lejos de ser aleatoria. Por ejemplo, en el caso de la telefonía MIC empleando 8 bits por muestra, es probable una considerable periodicidad a un octavo de la velocidad de bits y, durante los periodos de poco tráfico, puede suceder que la señal transmitida esté constituida casi enteramente de ceros. En estas condiciones, gran parte de la potencia del espectro MDP se concentrará en una o más rayas espectrales y el factor de dispersión podría aproximarse a 0 dB.

Además del carácter no aleatorio de la parte de información de la señal, se observarán también secuencias recurrentes en los preámbulos de las transmisiones con acceso múltiple por distribución en el tiempo (AMDT).

Por otra parte, en un sistema real, el espectro se modificará mediante conformación de impulsos y/o filtrado después de la modulación; sin embargo, los mayores efectos se obtendrán hacia los bordes del espectro y la densidad espectral máxima no variará mucho.

Para asegurar el grado deseado de dispersión, puede efectuarse una suma módulo 2 de una secuencia pseudoaleatoria de duración Nt con el tren de bits o de símbolos de información, como se indica, por ejemplo, en la Fig. 4.

En una anchura de banda de referencia de 4 kHz, el factor de dispersión de energía (D) puede definirse como:

$$D = 10 \log \frac{\text{potencia total}}{\text{potencia máxima por 4 kHz}} \quad (3)$$

Cuando se utilice una secuencia pseudoaleatoria para dispersar la energía, el grado de dispersión puede calcularse mediante las ecuaciones (1) y (3) si $1/Nt \geq 4$ kHz, y mediante las ecuaciones (2) y (3) si $1/Nt < 4$ kHz.

Como indican las ecuaciones precedentes, el grado de dispersión es proporcional a N mientras la duración de la secuencia sea menor que la inversa de la anchura de banda de referencia. Apenas habrá dispersión suplementaria una vez que se alcance una duración de la secuencia de 250 μ s (anchura de banda de referencia de 4 kHz).

4.3 Técnicas de dispersión de energía

4.3.1 Método 1: Pseudoaleatorizador

Este método consiste en mantener la secuencia del tren de impulsos de transmisión en una forma similar a la de una secuencia aleatoria, independientemente de la carga de los canales. Para ello, se sintetiza una secuencia pseudoaleatoria, a partir del tren de impulsos de información, producido por un generador de códigos pseudoaleatorios utilizando un circuito lógico «O exclusivo» (circuitos sumador módulo 2). En la Fig. 4a) se muestra el esquema de un equipo de dispersión de energía de la unidad transmisora. En la unidad receptora, un generador de códigos pseudoaleatorios, que genera la misma secuencia de códigos que la unidad transmisora, recupera la información original mediante la síntesis, en un circuito «O exclusivo», de la secuencia de códigos pseudoaleatorios producidos en el generador de códigos pseudoaleatorios con el tren de impulsos de transmisión. La Fig. 4b) muestra un esquema de la unidad receptora.

Una de las ventajas de esta técnica es que la dispersión de energía puede realizarse sin degradación de calidad del tren de impulsos de información. Por contra, tiene la desventaja de que exige la sincronización del generador de códigos pseudoaleatorios de la unidad receptora con el de la unidad transmisora. Sin embargo, en el caso de sistemas AMDT, la sincronización entre ambos generadores de códigos pseudoaleatorios puede efectuarse mediante la señal de sincronismo de ráfagas, ya prevista en la unidad receptora, y por lo tanto no requiere dispositivo suplementario adicional alguno.

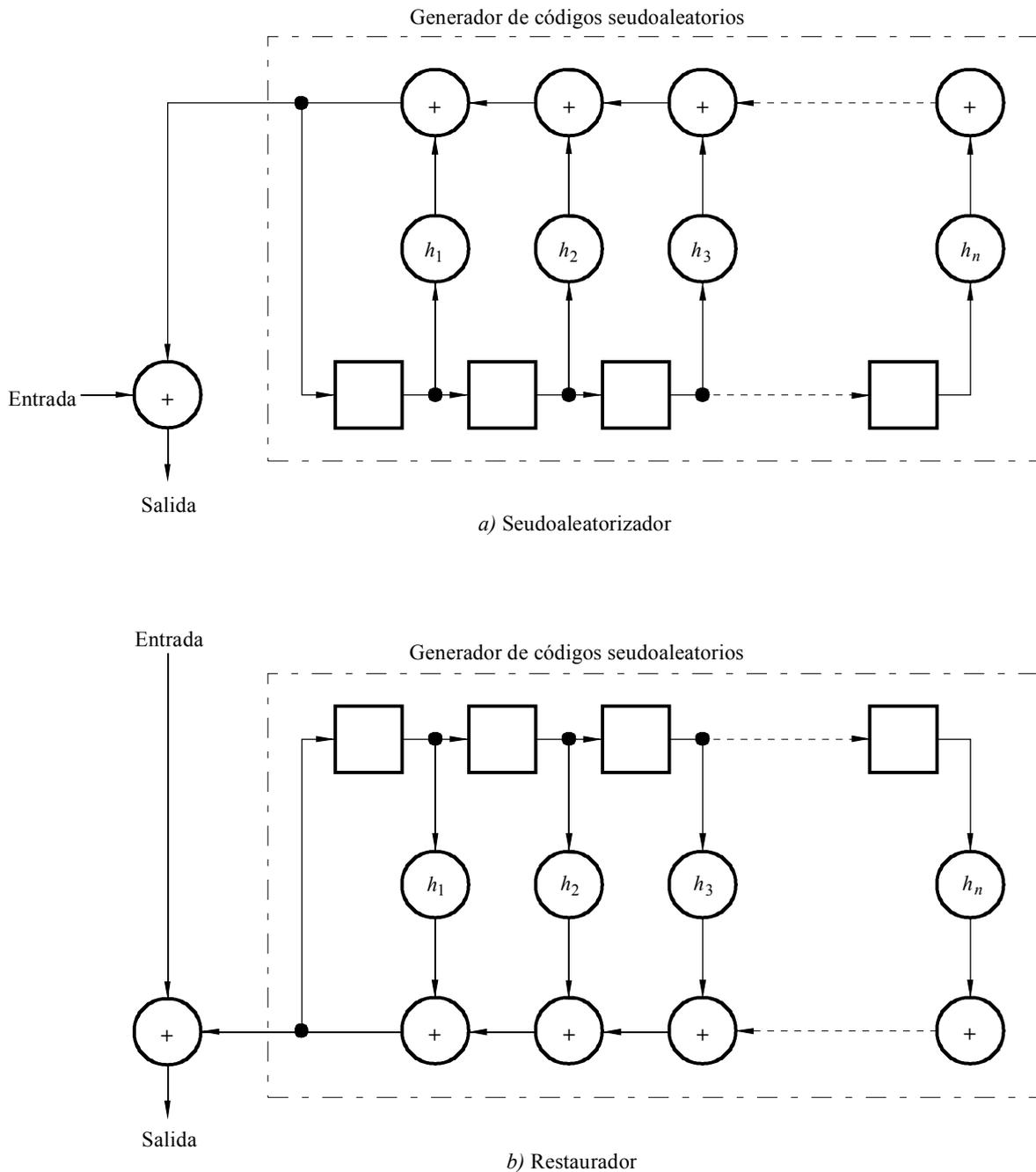
Se señala que la velocidad de transmisión de símbolos (o segmentos) de la secuencia de código pseudoaleatorio no tiene que ser necesariamente igual a la del tren de impulsos de información.

Se han realizado transmisiones experimentales de televisión digital por satélite y se ha medido el factor de dispersión de energía. Con una señal MDP cuadrifásica de 60 Mbit/s y una secuencia de pseudoaleatorización de 11 etapas, el factor de dispersión de energía medido fue de 37 dB. El factor de dispersión teóricamente óptimo con este tipo de señal sería 38,7 dB.

4.3.2 Método 2: Autoseudoaleatorizador

En esta técnica de dispersión de energía se utilizan registros de desplazamiento con un bucle de realimentación de la salida a la entrada, y de la entrada a la salida, respectivamente, instalados en las unidades receptora y transmisora. En la unidad transmisora, se realiza una conversión de código para cada bit del tren de impulsos de información. En el receptor se reconvierte cada bit del tren de impulsos de transmisión, recuperándose así el tren de impulsos de información original. Las Figs. 5a) y 5b) muestran circuitos típicos de dicho pseudoaleatorizador y despseudoaleatorizador, respectivamente.

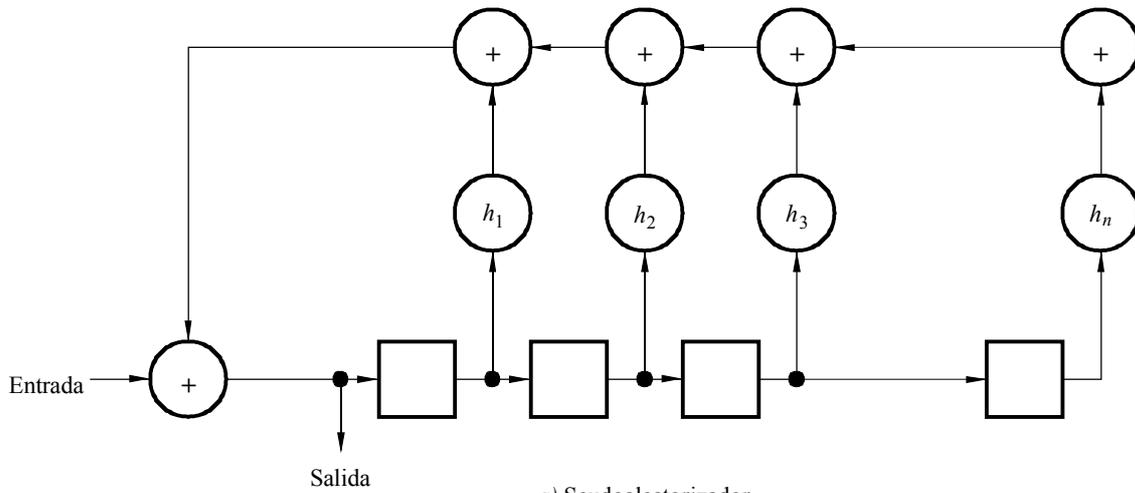
FIGURA 4
Ejemplo de circuitos de dispersión de energía de acuerdo con el método 1



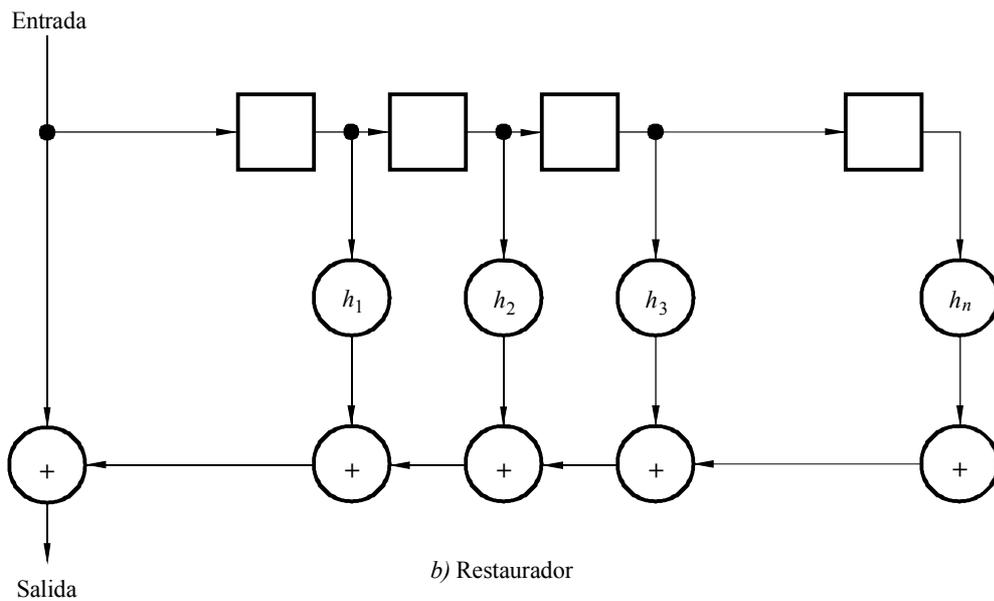
Nota 1 - $h_1, h_2 \dots h_n$ representan las conexiones internas del registro de desplazamiento, que determinan la secuencia de códigos.

FIGURA 5

Ejemplo de circuitos de dispersión de energía de acuerdo con el método 2



a) Seudoaleatorizador



b) Restaurador

Nota 1 – $h_1, h_2 \dots h_n$ representan las conexiones internas del registro de desplazamiento, que determinan la secuencia de códigos.

D05

Una de las ventajas de este método de dispersión de energía es que no requiere la sincronización entre el seudoaleatorizador y el restaurador; pero tiene la desventaja de que, si r es el número de pasos del registro de desplazamiento, el estado inicial de este registro afecta a los primeros r bits del tren de impulsos de transmisión y, en consecuencia, un solo bit erróneo en la cadena de transmisión de radiofrecuencia afecta a los r bits que siguen inmediatamente al bit erróneo. Este método de dispersión de energía, sin embargo, asociado a la detección y corrección de errores, podría aplicarse convenientemente a sistemas MIC de transmisión de datos, especialmente a los que funcionan en modo continuo, en contraposición a los que lo hacen en modo AMDT.

4.4 Factor de dispersión de la energía para sistemas AMDT

El grado de dispersión obtenido mediante el método 1 es directamente proporcional a la longitud de la secuencia pseudoaleatoria. Ahora bien, es inútil emplear una secuencia de duración superior a 250 μ s, ya que las rayas del espectro de dispersión tendrían entonces una separación de menos de 4 kHz. En un sistema AMDT, la señal pseudoaleatoria generada en el receptor puede sincronizarse con suma facilidad con la generada por el transmisor si se inicia cada vez la secuencia con cada ráfaga AMDT. Esto significa que la longitud de las secuencias sería generalmente inferior a 250 μ s y que no se obtendría una dispersión ideal.

Los efectos de dispersión de energía para una señal AMDT dependen de la longitud de la secuencia pseudoaleatoria, la longitud de la trama, el número de ráfagas, la longitud de cada ráfaga, los métodos de realizar la pseudoaleatorización, etc. Suponiendo, para simplificar, que la longitud de cada ráfaga es igual o inferior a 250 μ s y que la secuencia de dispersión es la misma para cada ráfaga en cada trama, el factor de dispersión de energía (D) puede determinarse aproximadamente por las siguientes ecuaciones:

$$D = 10 \log N + 10 \log B - K \quad \text{cuando } N < M \quad (4)$$

$$D = 10 \log M + 10 \log B - K \quad \text{cuando } N > M \quad (5)$$

donde:

N : longitud de la secuencia pseudoaleatoria (símbolos)

M : longitud de la secuencia de información (símbolos)

B : número de ráfagas en una trama

K : margen para el efecto de dispersión de energía.

En las ecuaciones precedentes, K es el término de variación estadística, que indica el grado decreciente de los efectos de dispersión de energía debido:

- al efecto de la coincidencia parcial entre una secuencia de información y una secuencia pseudoaleatoria;
- al efecto de la diferencia entre la longitud de la secuencia de información y la de la secuencia pseudoaleatoria;
- al efecto de la coherencia de fase de la portadora entre las ráfagas.

De estos efectos, el primero puede evaluarse como sigue: cuando la secuencia de información tiene una escasa correlación de trama, el margen debido a la coincidencia parcial depende del periodo de observación del espectro de potencia. En cambio, cuando la secuencia de información presenta una gran correlación de trama, se generará un esquema de secuencia casi igual en cada trama, de modo que su margen puede estimarse considerando el periodo de trama como el periodo de observación antes mencionado.

El segundo efecto podría ser despreciablemente pequeño eligiendo adecuadamente el grado y el valor inicial de la secuencia pseudoaleatoria, si la longitud de esa secuencia es inferior en varias veces la de la secuencia de información.

El tercer efecto es también despreciable, ya que las frecuencias portadoras de las ráfagas suelen diferir entre sí más de varios cientos de Hz.

Es evidente que la complejidad del sistema se reducirá considerablemente si la secuencia pseudoaleatoria se aplica únicamente a la parte de información de la señal y no al preámbulo de una ráfaga AMDT. En general, el preámbulo consistirá, al menos en parte, en una simple secuencia recurrente, e incluso podrá contener, en algunos casos, un periodo de portadora no modulada. Los resultados expuestos en el Cuadro 3 demuestran que, para una secuencia recurrente de preámbulo

0011 en un sistema MDP-4, el preámbulo no contribuirá en mucho a la densidad espectral máxima, salvo quizá en sistemas de velocidad de transmisión de bits reducida. Otras secuencias de preámbulo de duración igual a la supuesta en el Cuadro 3 podrán ser 3 dB menos favorables, como máximo.

Para dar una idea de los factores de dispersión que pueden lograrse en la práctica, en el Cuadro 3 se indican los valores correspondientes a un sistema AMDT en que el preámbulo no está sujeto a dispersión. Se partió de las hipótesis siguientes:

- longitud de trama: 125 μ s;
- modulación: MDP de 4 estados de fase;
- señal de preámbulo: 40 bits de estructura 0011, en alternancia;
- las frecuencias portadoras de todas las estaciones están a 4 kHz una de otra pero el ritmo de los símbolos de las distintas estaciones no está necesariamente en fase;
- los generadores de secuencias pseudoaleatorias se ponen a cero después de cada ráfaga.

CUADRO 3

Ejemplos de factores de dispersión de energía para una serie de longitudes de secuencias pseudoaleatorias

	Factores de dispersión en sistemas de acceso único (dB)			Acceso por 10 estaciones iguales						Factores de dispersión resultante (dB)		
				Potencia máxima en una banda de 4 kHz (dB con relación a la potencia total en régimen permanente)								
				a) Debida a los preámbulos			b) Debida a la información					
Velocidad de transmisión de bits (Mbit/s)	10	50	250	10	50	250	10	50	250	10	50	250
Señal moduladora aleatoria	31	38	45							31	38	45
Secuencia pseudoaleatoria de 127 bits	12	12	12	-23	-37	-51	-20	-22	-22	20	22	22
Secuencia pseudoaleatoria de 511 bits	18	18	18	-23	-37	-51	-20	-28	-28	20	28	28
Secuencia pseudoaleatoria de 2 047 bits	24	24	24	-23	-37	-51	-	-29	-34	-	29	34
Secuencia pseudoaleatoria de 32 767 bits	25	32	36	-23	-37	-51	-	-	-36	-	-	36
Sistema típico de modulación de frecuencia plenamente cargado con la misma anchura de banda que el sistema digital (basado en el espectro gaussiano y en una relación anchura de banda RF/anchura de banda base igual a 15)	27	34	41									

La variación estadística del espectro de potencia es tal que el 1% de las rayas espectrales rebasarán en 6,5 dB el valor cuadrático medio (r.m.s.) de la envolvente.

El cálculo de la densidad de potencia espectral máxima determinada por preámbulos en la banda de 4 kHz indica que, en determinadas situaciones, con un contenido de preámbulo de cuadro o de paquete relativamente alto, y grandes redes de estaciones terrenas (para sistemas que utilizan paquetes de duración variable), la densidad de potencia espectral de la señal de sincronización puede rebasar la densidad de potencia espectral correspondiente de la parte información de la señal. Este fenómeno es más intenso en velocidades binarias bajas y con largas duraciones de cuadro.

4.5 Ejemplo de aplicación de la dispersión de energía a un sistema AMDT experimental

Se ha utilizado el método 1 de dispersión de energía en el sistema TTT, que es un sistema AMDT experimental (50 Mbit/s) desarrollado en Japón para sistemas de radiocomunicaciones por satélite. En este sistema se pseudoaleatorizan únicamente los bits de información; sin embargo, el valor de cresta del espectro de potencia se reduce unos 20 dB.

Conviene tener en cuenta que, cuando se aplica a un sistema AMDT una técnica de dispersión de energía con una secuencia pseudoaleatoria, la probabilidad de que se produzca una falsa detección de una «palabra única» determinada puede aumentar en una medida que es función del modo de sincronización de ráfaga.

Puede evitarse la falsa detección de la «palabra única» alterando el estado inicial de la secuencia de códigos aleatorios para cada trama.

5 Conclusiones

Se infiere que los métodos de dispersión de energía que ofrecen mayores posibilidades son los siguientes:

- para los sistemas telefónicos con modulación de frecuencia: la adición de una señal de ruido ajustada en función de la carga, por debajo de la banda de base, como en el método 1b) de la Fig. 1. La señal ajustada puede ser un ruido o bien una onda triangular «simétrica», aunque en la práctica esta última es de empleo más fácil;
- para los sistemas de televisión con modulación de frecuencia: la adición de una onda triangular «simétrica» sincronizada con la frecuencia de imagen, como en el método 1a) de la Fig. 1;
- para los sistemas con modulación digital: conversión de código mediante la cual el flujo de bits de información se multiplica por un tren de impulsos pseudoaleatorio por métodos similares a los señalados en el § 4.

Las ondas de dispersión triangulares se aplican actualmente a portadoras moduladas en frecuencia en la mayoría de las redes del servicio fijo por satélite. Las ventajas que en teoría ofrecen las señales de dispersión triangulares se hacen efectivas en la práctica sólo en la medida en que la señal utilizada es lineal. El uso de estos métodos podría proporcionar una dispersión de energía tan grande como la que se obtiene en condiciones de carga máxima. Sin embargo, el exceso de la potencia de dispersión por banda de 4 kHz, con relación a la de carga máxima (suponiendo un espectro de distribución gaussiana), no será realmente inferior, en la práctica, a 3 dB en el caso de la telefonía y a 5 dB en el de la televisión. Con este nivel de dispersión de energía, la adición a la anchura de banda en radiofrecuencia ocupada no ha planteado dificultades.

La dispersión de energía que se obtiene actualmente empleando ondas triangulares ha demostrado ser satisfactoria en la práctica, salvo cuando la señal deseada es la de un sistema de un solo canal por portadora. Con la utilización de técnicas de dispersión mediante ondas triangulares de baja frecuencia (≤ 1 kHz) en sistemas multicanales, un sistema deseado de un solo canal por portadora puede estar expuesto a la casi totalidad de la potencia de una portadora interferente durante periodos cortos. Este problema podría resolverse en los sistemas de televisión con modulación de frecuencia, recurriendo a la transformación de la señal de vídeo para la dispersión o utilizando una señal de dispersión triangular en la frecuencia de línea de televisión.
