

## RECOMENDACIÓN UIT-R S.730\*

**Compensación de los efectos causados por discontinuidades debidas a la conmutación en la transmisión de datos en banda vocal y los desplazamientos de frecuencia por efecto Doppler en el servicio fijo por satélite**

(Cuestión 7/4)

(1992)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que los sistemas de satélites no geoestacionarios en órbita circular están expuestos a desplazamientos de frecuencia por efecto Doppler que afectan a la estabilidad de la señal de radiofrecuencia, así como a desplazamientos de frecuencia diferenciales por efecto Doppler que ocasionan, respectivamente un «ensanchamiento» o una «contracción» de la banda de base en interconexiones analógicas y deslizamientos de trama en interconexiones digitales;
- b) que las perturbaciones orbitales de los satélites geoestacionarios pueden originar variaciones cíclicas en los retardos de propagación del trayecto de transmisión inferiores a 3 ms;
- c) que la diferencia entre la audiofrecuencia aplicada a un extremo del circuito y la frecuencia recibida en el otro extremo no debe rebasar 2 Hz de acuerdo con la Recomendación UIT-T G.225;
- d) que el valor máximo permitido de deslizamiento de trama en las interconexiones digitales depende de los sistemas de redes conectados;
- e) que las operaciones de conmutación que se efectúan en los sistemas de satélites no geoestacionarios en órbita circular causan discontinuidades debidas a la conmutación motivadas por los distintos trayectos de propagación a través de los dos satélites utilizados,

*recomienda*

- 1 que para la transmisión de telefonía analógica mediante satélites no geoestacionarios del servicio fijo por satélite, se corrija el desplazamiento Doppler diferencial cuando el producto de la banda de base (MHz) por el número de revoluciones diarias del satélite con respecto a la Tierra, sea superior a 0,666;
- 2 que es necesario compensar las discontinuidades debidas a la conmutación que dan lugar a diferencias de tiempo superiores a 20 ms en la transmisión de telefonía analógica, insertando al efecto dispositivos adecuados de retardo variable;
- 3 que se apliquen memorias de almacenamiento adaptables para la corrección del desplazamiento Doppler diferencial de los enlaces digitales por satélite en el extremo receptor o transmisor, respectivamente, dependiendo las dimensiones de la memoria de los parámetros de la órbita, de la velocidad de transmisión de datos y del valor máximo permitido de deslizamiento de trama;
- 4 que, para la interconexión digital de redes síncronas nacionales, la memoria de almacenamiento se dimensione teniendo en cuenta la necesidad de suprimir completamente las variaciones en el retardo de la transmisión;

---

\* 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).

5 que las siguientes Notas se consideren parte integrante de la presente Recomendación.

NOTA 1 – La transmisión de datos y de telefax por un canal telefónico analógico compensado de acuerdo con el § 1 y que, por consiguiente, cumple la Recomendación UIT-T G.225, no requiere disposiciones adicionales para compensar el desplazamiento Doppler diferencial.

NOTA 2 – La transmisión de datos que requiere una anchura de banda superior a la de un canal telefónico necesita una corrección del desplazamiento Doppler diferencial para un valor de  $s$  más reducido que el indicado en el § 1.

NOTA 3 – La transmisión de señales de televisión analógica en los sistemas reales del servicio fijo por satélite no resulta afectada por el desplazamiento Doppler diferencial o las discontinuidades debidas a la conmutación a causa de la diferencia en el trayecto de propagación y, por consiguiente, no exige correcciones.

NOTA 4 – En la transmisión de datos, la aparición de discontinuidades debidas a la conmutación puede depender de la técnica de corrección de errores del sistema.

NOTA 5 – Para compensar el desplazamiento Doppler diferencial mencionado en el § 1 pueden emplearse dispositivos de retardo variable como los mencionados en el § 2. Puede emplearse un dispositivo común para ambos casos.

NOTA 6 – El § 1 se refiere únicamente a las órbitas circulares de satélites no geoestacionarios. Los otros tipos de órbitas no geoestacionarias, como las órbitas elípticas muy inclinadas (por ejemplo, MOLNIYA o TUNDRA) deben seguirse estudiando, con objeto de utilizar tales sistemas en el futuro.

NOTA 7 – Se espera que las discontinuidades debidas a la conmutación de 20 ms indicadas en el § 2 no sean críticas para los sistemas telefax de grupo 3 actuales y que no causen degradaciones inaceptables. No obstante, las futuras Recomendaciones UIT-T sobre la calidad del servicio telefax podrían incluir información específica sobre el máximo número posible de interrupciones de transmisión, en cuyo caso podrían precisarse estudios ulteriores.

NOTA 8 – En los Anexos 1 y 2 figura el análisis en el que se basa la presente Recomendación.

## ANEXO 1

### **Influencia de los desplazamientos de frecuencia debidos al efecto Doppler y de las discontinuidades debidas a la conmutación en el servicio fijo por satélite**

#### **1 Efecto Doppler (aplicable a los satélites no geoestacionarios)**

El valor del desplazamiento total de frecuencia debido al efecto Doppler entre las estaciones terminales de un sistema del servicio fijo por satélite, depende de las longitudes de onda utilizadas y de la velocidad relativa del satélite con respecto a las estaciones terrenas. El componente principal del desplazamiento debido al efecto Doppler, es decir, el desplazamiento de la portadora o de una frecuencia de referencia de la transmisión, puede eliminarse en el receptor. No obstante, puede ser necesario compensar también el desplazamiento diferencial a lo largo de la anchura de banda radioeléctrica ocupada por la señal que produce un «ensanchamiento» o una «contracción» de la señal en la banda de base. Según la situación de las estaciones terrenas y las características de la órbita del satélite, puede haber adición o sustracción de los desplazamientos de frecuencia que por

efecto Doppler se producen entre la estación terrena transmisora y el satélite, y entre el satélite y la estación terrena receptora. Si se toman 5000 km como valor probable de la altura mínima de la órbita de un satélite de telecomunicaciones, el «ensanchamiento» o la «contracción» del espectro de la señal en la banda de base no será superior a  $2 \times 10^{-5}$ . En la mayoría de los casos, la altura de la órbita será mayor y el efecto Doppler mucho menor, e incluso prácticamente nulo, en el caso del satélite geoestacionario.

El valor máximo del efecto Doppler resultante de transmisiones destinadas a una estación espacial de un satélite colocado en una órbita circular, o procedentes de ella, puede evaluarse a partir de la relación:

$$\Delta F \approx \pm 1,54 \times 10^{-6} \times F \times s \tag{1}$$

donde:

$\Delta F$ : desplazamiento de frecuencia debido al efecto Doppler

$F$ : frecuencia de trabajo

$s$ : número de revoluciones diarias (24 h) del satélite con relación a un punto fijo de la Tierra.

Esta relación puede utilizarse también para calcular el desplazamiento máximo diferencial de frecuencia debida al efecto Doppler en una banda de frecuencias. En el Cuadro 1, destinado a facilitar los cálculos, se indica cierto número de valores de  $s$  para diversos valores de altitud de órbitas circulares ecuatoriales.

CUADRO 1

Número de revoluciones diarias con relación a la Tierra, $s$	Altitud de las órbitas circulares ecuatoriales (km)	Periodo (h)
0	35 600	24
1	20 240	12
2	13 940	8
3	10 390	6
4	8 080	4,8
5	6 420	4
6	5 170	3,4
7	4 190	3

En un sistema de acceso múltiple por distribución de frecuencia (AMDF), cada estación participante utiliza una porción de la banda de frecuencias del repetidor del satélite. Como las transmisiones provenientes de las diferentes estaciones son independientes en el tiempo, una diferencia eventual de tiempo no produce ningún efecto desfavorable. En cambio, se producirá un efecto Doppler, variable en función del tiempo, en las transmisiones provenientes de cada estación.

En lo que respecta a los satélites utilizados para la retransmisión simultánea de señales provenientes de varias estaciones terrenas, puede ser necesario tomar especialmente en consideración el efecto Doppler.

El Cuadro 2 muestra los valores máximos de los desplazamientos de frecuencia debidos al efecto Doppler en el satélite, en 6 GHz. Estos valores corresponden a órbitas ecuatoriales, en la hipótesis de que el satélite se desplaza en el mismo sentido que el de rotación de la Tierra.

Debido a varias perturbaciones, la posición de un satélite en la órbita de los satélites geoestacionarios varía. Si la posición del satélite se mantiene dentro de un límite de  $\pm 0,1^\circ$  en longitud y latitud, la velocidad relativa máxima del satélite con respecto a la estación terrena es menor que 3,8 m/s aproximadamente, y el desplazamiento máximo de frecuencia debido al efecto Doppler no será superior a 76 Hz en 6 GHz.

Para evitar interferencias debidas al efecto Doppler entre los canales radioeléctricos adyacentes, se pueden utilizar bandas de guarda. Según la ubicación de las estaciones, la señal transmitida por una estación podría tener su portadora desplazada hacia las frecuencias superiores, en tanto que la transmitida por una estación en un canal adyacente tendría su portadora desplazada hacia las frecuencias inferiores. Otra solución consiste en corregir los desplazamientos de frecuencia mediante técnicas adecuadas.

Por ejemplo, suponiendo una banda de guarda de una anchura igual al desplazamiento máximo debido al efecto Doppler indicado en el Cuadro 2 para un sistema de 10 canales, la anchura total de las bandas de guarda sería igual a 18 veces los valores indicados (siempre en 6 GHz).

CUADRO 2

### Desplazamiento máximo de frecuencia debido al efecto Doppler

Periodo (h)	6	8	12	24
Altura aproximada (km)	11 000	14 000	20 000	36 000
Ángulo de elevación mínimo de la antena: $5^\circ$ Desplazamiento máximo de frecuencia debido al efecto Doppler, en 6 GHz (kHz)	27,7	18,5	9,3	0,0

En los sistemas de acceso múltiple por distribución en el tiempo (AMDT), todas las estaciones transmiten en la misma frecuencia portadora nominal, portadora que sólo debe transmitirse durante el intervalo de la trama atribuido a la estación. Durante la transmisión es probable que haya de modularse la portadora por desplazamiento de fase o de frecuencia. El efecto Doppler hará que las transmisiones lleguen al satélite y sean transmitidas por éste en frecuencias que variarán alrededor de la frecuencia portadora nominal. Los receptores de las estaciones terrenas deben, pues, ajustarse, a los cambios bruscos que se produzcan en la frecuencia de la portadora. Posiblemente ello exija aumentar el tiempo de guarda entre ráfagas de señales y prever un periodo más dilatado, dentro de la ráfaga, para la recuperación de la portadora y la sincronización de las ráfagas en el caso de satélites no geoestacionarios.

#### 1.1 Telefonía

Cuando se utiliza la telefonía con multiplaje por distribución de frecuencia, es necesario limitar la anchura de banda o la velocidad angular geocéntrica aparente de los satélites con relación al centro de la Tierra, para evitar cualquier valor inadmisibles del desplazamiento de frecuencia diferencial debida al efecto Doppler (a menos que se introduzcan correcciones que permitan compensar este efecto).

Según la Recomendación UIT-T G.225, la diferencia entre una audiofrecuencia aplicada a un extremo de un circuito telefónico y la frecuencia recibida en el otro extremo no debe ser superior a 2 Hz. La Comisión de Estudio XV de Normalización de las Telecomunicaciones sigue estudiando la cuestión del error en la frecuencia restituida.

Hay que advertir que en un enlace con un solo satélite el error de 2 Hz no se excede si el producto de la banda de base (MHz) por el número de revoluciones diarias con relación a la Tierra,  $s$ , no excede de 0,666; sin embargo, es probable que los equipos de multiplex introduzcan un error adicional.

Para tales velocidades angulares, el efecto Doppler provoca igualmente un desplazamiento de las frecuencias piloto. Estos desplazamientos de frecuencia pueden corregirse mediante uno de los métodos siguientes:

- dispositivo de retardo de tiempo variable,
- ajuste automático de las frecuencias portadoras utilizadas en el equipo múltiplex por distribución de frecuencia, a fin de compensar el efecto Doppler y reducir así los errores totales de frecuencia a valores suficientemente pequeños para ser admisibles.

El primero de estos métodos tiene la ventaja de que los errores debidos al movimiento del satélite podrían suprimirse, de un modo efectivo, de la misma forma que han sido introducidos (es decir, por las variaciones del retardo de propagación durante el paso). Este método también eliminaría todos los efectos de los desplazamientos Doppler en las señales de la banda de base y, mediante disposiciones adecuadas, permitiría evitar las discontinuidades por conmutación, debidas a la conmutación al pasar de un satélite al siguiente. Podrían ajustarse las variaciones del tiempo de propagación, basándose en las previsiones relativas a la órbita, o mediante un servomecanismo que utilice una señal piloto transmitida por la estación terrena con destino al satélite y enviada nuevamente a la misma estación terrena (método del bucle). El método del bucle presenta las ventajas siguientes:

- se tiene la seguridad de que el satélite sólo recibe las frecuencias correctas; esta ventaja puede ser de particular importancia en ciertos sistemas, por ejemplo, en los que el sentido Tierra-espacio emplea canales o grupos de canales muy próximos con modulación de banda lateral única;
- podría evitarse, hasta cierto punto, el «ensanchamiento» de la señal debido al efecto Doppler, por ejemplo dividiendo la anchura de banda de recepción en partes convenientemente separadas y previendo compensaciones independientes para los grupos de circuitos provenientes de cada una de las otras estaciones terrenas.

Podría emplearse, alternativamente, una variante según la cual la compensación de las variaciones de tiempo de propagación sólo se aplicaría en el extremo receptor y estaría controlada por señales piloto procedentes de estaciones alejadas. En este caso, habría que adaptar el equipo múltiplex por distribución de frecuencia de cada una de las estaciones terrenas, a fin de tener en cuenta el «ensanchamiento» o la «contracción» de la banda de base por efecto Doppler. Se ruega a las administraciones que comuniquen al UIT-T sus recomendaciones o conclusiones a propósito de esta adaptación, incluidos los métodos de control del equipo múltiplex por distribución de frecuencia de la estación terrena basados en el principio del bucle, expuesto anteriormente a propósito del primer método, o en el principio de un control especial para cada ruta.

En todo sistema del servicio fijo por satélite en el que se utilice la modulación de amplitud con banda lateral única puede ser necesario corregir el efecto Doppler.

## 1.2 Telegrafía y transmisión de datos

Si los canales telefónicos satisfacen las condiciones de la Recomendación UIT-T G.225, esto significa que, en los canales telegráficos y en los canales de transmisión de datos que se puedan establecer en ellos, puede despreciarse el efecto Doppler o se ha compensado de modo adecuado (véase el § 1.1).

## 1.3 Telefotografía

Si se establecen canales de telefotografía en canales telefónicos que satisfacen las condiciones de la Recomendación UIT-T G.225, se puede despreciar el efecto Doppler y considerar que se ha compensado de manera adecuada.

## 1.4 Transmisión de datos de banda ancha

Conviene señalar que deben preverse tales correcciones del efecto Doppler para los canales de telefotografía o de transmisión de datos derivados de los precedentes, que exigen anchuras de banda mayores que la de un canal telefónico único (por ejemplo, anchuras de banda de grupo primario o secundario).

## 1.5 Televisión

La variación de la frecuencia de trama debida al efecto Doppler es mínima y es muy posible que, desde el punto de vista de las perturbaciones en los receptores de televisión en blanco y negro privados, el factor limitativo sea la precisión de la frecuencia de trama obtenida en la fuente del programa y no el efecto Doppler.

Aunque es probable que finalmente interese corregir el efecto Doppler en las señales de televisión en color, los primeros experimentos realizados con satélites han demostrado que los receptores normales de televisión en color funcionarán en buenas condiciones, en particular los dotados de osciladores de subportadora controlados por cuarzo, con una magnitud de desplazamiento por efecto Doppler del orden de la que probablemente es de esperar en un sistema práctico del servicio fijo por satélite.

## 2 Discontinuidades de conmutación (aplicable a los satélites no geostacionarios)

Dos o más estaciones terrenas sólo pueden utilizar satélites que aparecen y desaparecen, mientras hay visibilidad entre ellas y los satélites. Luego, para mantener la comunicación, las estaciones tienen que conmutar – o «pasar» – a otro satélite que se encuentra también en este campo de visibilidad común. Con algunas órbitas, o cuando entre las estaciones terrenas media una distancia demasiado grande, se pueden producir interrupciones relativamente prolongadas, si el primer satélite sale del campo de visibilidad simultánea antes de que haya entrado otro satélite. Estas interrupciones pueden evitarse utilizando satélites controlados, equidistantes entre sí y en número suficiente, situados en órbitas periódicas que tengan su proyección sobre puntos fijos de la Tierra. A estos sistemas de satélites que tienen estas órbitas se les denomina a menudo satélites en fase, y el más sencillo y conocido de ellos es el de órbita circular ecuatorial en fase.

Aun cuando con tales sistemas se pueden evitar las interrupciones debidas a la conmutación, en general se producirán ligeras discontinuidades de superposición de comunicaciones entre dos estaciones en el instante de la conmutación, según que el trayecto de propagación vía el nuevo satélite sea más corto o más largo que el trayecto vía el satélite anterior. El cálculo de la longitud de los trayectos de propagación, o de los tiempos de propagación, y sus diferencias, depende de sencillas relaciones geométricas.

En el caso de un enlace de varios saltos, no será frecuente que coincidan las discontinuidades debidas a la conmutación de las distintas secciones, por lo que su número diario será igual a  $n \times m$ , siendo  $n$  el número de saltos y  $m$  la media diaria de discontinuidades por sección de un salto. En los sistemas de satélites en fase, las diferencias de tiempo no excederán de 10 ms para ciertos pares de estaciones terrenas, mientras que, para otros pares de estaciones, alcanzarán o excederán de 20 ms. En los sistemas de satélites no en fase, estas diferencias de tiempo estarán comprendidas entre 0 y 30 ms o más. Conviene señalar que estas discontinuidades son previsibles y que se pueden tomar medidas para contrarrestarlas. El empleo de dispositivos de retardo de tiempo variable permite reducirlas a proporciones despreciables.

NOTA – Los circuitos de una estación terrena que utiliza un satélite, sea éste geoestacionario o no, pueden quedar interrumpidos durante periodos previsibles cuando el satélite utilizado tiene, con respecto a la estación terrena, aproximadamente la misma orientación que el Sol o que otro satélite que trabaje en la misma frecuencia, o incluso cuando un satélite alimentado por células solares y que no dispone de acumuladores queda eclipsado por la Tierra. Para evitar estas interrupciones, hay que prever un encaminamiento alternativo por circuitos terrenales o por otro satélite durante esos periodos de «ausencia de satélite».

## 2.1 Telefonía

Las diferencias de tiempo de propagación de hasta unos 20 ms, por ejemplo, debidas a la conmutación de un satélite a otro, no deberían perturbar grandemente las conversaciones telefónicas. Sin embargo, una discontinuidad de esta importancia en la transmisión puede originar errores en los sistemas de señalización multifrecuencia existentes, como el sistema de señalización intercontinental N.º 5 del UIT-T y el utilizado con el sistema TASI. Los sistemas de señalización, tales como el sistema N.º 6 del UIT-T que utiliza impulsos de gran velocidad, pueden verse mucho más afectados por los errores de este tipo.

## 2.2 Telegrafía y transmisión de datos

Los efectos que interesan son los debidos exclusivamente a diferencias de tiempo de propagación entre un trayecto por satélite y otro. Estos efectos son de dos tipos diferentes:

- la prolongación o la reducción de elementos telegráficos cuando la diferencia de tiempo de propagación es relativamente grande, es decir, cuando excede una fracción importante de un elemento;
- las discontinuidades de fase de tonos de audiofrecuencia, que dan lugar a una distorsión telegráfica, cada vez que la diferencia de tiempo de propagación es superior a una fracción del periodo de la frecuencia más elevada de la banda de base utilizada por un canal telefónico de un sistema de banda ancha, empleado para la telegrafía armónica.

Según ciertas informaciones preliminares (véase el Apéndice 1), parece ser que, en un canal telegráfico arrítmico no protegido, que funcione a 50 Bd, el número medio de caracteres erróneos, causados por discontinuidades de una duración igual como máximo a 7,5 ms, puede no exceder de 0,25, aproximadamente, por discontinuidad. Este número medio de errores aumenta probablemente hasta 1 para las discontinuidades de una duración de unos 10 a 12 ms, mientras que puede llegar a 2 o más para discontinuidades de 20 a 30 ms.

La duración de las discontinuidades que se producirán probablemente en los sistemas de satélites no geoestacionarios dará lugar a caracteres erróneos en los sistemas de telegrafía síncrona y de multiplexaje por distribución en el tiempo. Estas discontinuidades pueden desnaturalizar señales de selección tales como las empleadas en el servicio télex, originar errores de encaminamiento y, especialmente en los sistemas automáticos, ser causa de posibles errores de tasación.

En algunos circuitos telegráficos, en particular en los prolongados por un radioenlace en ondas decamétricas, se emplean dispositivos de corrección automática de errores (ARQ). Estos dispositivos proporcionan además una protección contra los errores debidos a causas distintas de las discontinuidades debidas a la conmutación. Para justificar la concesión de un trato especial a los circuitos que utilizan sistemas del servicio fijo por satélite, hay que tener en cuenta la frecuencia relativa de las perturbaciones que dan lugar a errores, según afecten la conexión espacial y sus prolongaciones «terrenales», o los circuitos internacionales establecidos por otros medios. Si, después de examinar todas las causas de error en los canales telegráficos, parece necesario tomar medidas especiales contra los errores debidos a las discontinuidades, podrá estudiarse seguramente la posibilidad de recurrir a algún dispositivo particular, como una memoria intermedia que, al recibir una señal de «cambio de satélite», comience a almacenar las señales telegráficas sin perjuicio de retransmitirlas algo más rápidamente después de la operación de conmutación.

Otro método que permite reducir el número de los errores debidos a las discontinuidades de conmutación consiste en la utilización de un dispositivo de retardo variable.

Las discontinuidades de unos 20 ms tendrán dos efectos en la transmisión de datos:

- producción de errores en uno o varios bloques;
- pérdida de la fase de un bloque.

Los errores del primer tipo no serían graves si el paso de un satélite a otro no fuese demasiado frecuente; en realidad, serían análogos a los efectos de las perturbaciones eventuales que producen la conmutación o el ruido en los circuitos normales en línea. La pérdida de fase de un bloque es consecuencia directa de la discontinuidad y no tiene ningún equivalente en las transmisiones por los sistemas de líneas.

Sería preciso, pues, en los sistemas de transmisión de datos por satélite, restablecer la fase del bloque de señales en el circuito a cada paso de un satélite a otro, a menos que se adopten medios especiales para compensar la discontinuidad en el tiempo de propagación. No obstante, la pérdida de tiempo de utilización del circuito debida a este efecto no constituye ningún inconveniente grave si las conmutaciones no son muy frecuentes y si se obra de modo que la reposición en fase del sistema de transmisión de datos sea una operación automática.

### 2.3 Telefotografía

El efecto de las discontinuidades de conmutación sería el de producir un desplazamiento inmediato (hacia adelante o hacia atrás) de la parte de la imagen recibida después de la conmutación, con relación a la parte recibida justamente antes. Por ejemplo, con equipos que se ajusten a las normas del UIT-T y en el caso de un cilindro con una velocidad de 60 revoluciones por minuto, una discontinuidad de 20 ms produciría un desplazamiento de 2%, aproximadamente, de la anchura de la imagen, es decir, 0,5 cm para una imagen de 25 cm de anchura. Tal desplazamiento sería un grave defecto en la mayor parte de las imágenes, documentos, cartas meteorológicas, etc. Este desplazamiento se incrementaría con mayores velocidades de explotación. El valor tolerable del desplazamiento así causado deberá fijarse en colaboración con el UIT-T. Sin embargo, se ha observado que discontinuidades de conmutación del orden de 20 ms producirían distorsiones inaceptables en la mayoría de los casos y, por tanto, sería necesario evitarlas mediante métodos de compensación adecuados y obrando de modo que la transmisión de la imagen se haga fuera de los momentos de conmutación.

## 2.4 Televisión

La conmutación debida a la transferencia de un satélite no geoestacionario al siguiente es muy parecida a la conmutación entre fuentes de programas «no síncronos», y puede dar lugar a perturbaciones temporales en la base de tiempo del receptor. El tiempo real en que tiene lugar la perturbación variará en la práctica de acuerdo con la relación de fase relativa en el momento de la conmutación, pero estará generalmente comprendido entre 0,5 y 2,0 s.

La variación del tiempo de propagación como consecuencia de la conmutación puede introducir una pequeña discontinuidad de la señal de sonido, la cual, aunque perceptible, no debiera ser molesta.

Dado que no serán frecuentes las conmutaciones en un sistema del servicio fijo por satélite, sus efectos en las señales de sonido y de imagen no serán muy graves.

## 3 Resumen

La importancia del efecto Doppler y de las discontinuidades debidas a la conmutación en los sistemas del servicio fijo por satélite, varía con el tipo de servicio o de señal transmitida y con las características de la órbita del satélite. En general, es de esperar que en un sistema de telecomunicación por satélite geoestacionario no sean importantes el efecto Doppler ni las discontinuidades debidas a la conmutación, pero sí lo serán en el caso de sistemas de satélites no geoestacionarios.

La componente principal del efecto Doppler puede eliminarse en el receptor, pero quedará un «ensanchamiento» o una «contracción» de la banda de base, debido al desplazamiento diferencial. El efecto será despreciable en televisión en blanco y negro y probablemente tolerable en televisión en color. En telefonía, y con el empleo generalizado de las técnicas de multiplexado de banda ancha y de banda lateral única, habrá que compensar las modificaciones de la banda de base (efecto Doppler diferencial) mediante una igualación de los retardos de propagación en el conjunto de la banda de base, o por control automático de las frecuencias portadoras que se utilicen en el equipo de multiplexado. Se cree que esta compensación podrá realizarse en la práctica. En los servicios de telegrafía, transmisión de datos y telefotografía, que utilizan canales convenientemente corregidos para la transmisión telefónica, no será preciso tener en cuenta el efecto Doppler.

Se comprueba que, de no tomarse medidas especiales, las discontinuidades debidas a la conmutación entre satélites pueden conducir, en los canales telegráficos, a proporciones de errores que, para ciertas ubicaciones de un par de estaciones terrenas con relación a la órbita excedan los límites deseables indicados en la Recomendación UIT-T R.54, a saber, dos errores por 100 000 caracteres. En el Apéndice 1 se estudia esta cuestión y se exponen ciertos medios a los que puede recurrirse para atenuar los efectos en la transmisión telegráfica.

Se señalan a la atención del UIT-T y de la Comisión de Estudio (CE) 9 de Normalización de las Telecomunicaciones los problemas que pueden plantear, en los sistemas del servicio fijo por satélite, el efecto Doppler y las discontinuidades debidas a la conmutación; al UIT-T, en lo que concierne a la telefonía, a la telegrafía, a la telefotografía y a la transmisión de datos, y a la CE 9 de Normalización de las Telecomunicaciones en lo que se refiere a la televisión, incluido el canal de sonido asociado.

## APÉNDICE 1

## AL ANEXO 1

**1 Recomendaciones del UIT-T**

Según la Recomendación UIT-T R.57, el grado de distorsión isócrona en una sola sección no debe exceder del 10%.

En los *considerandos* de la Recomendación UIT-T R.54 se sugiere que una proporción de errores debidos a la distorsión de 2 por 100 000 señales telegráficas alfabéticas transmitidas, constituye un objetivo deseable.

**2 Proporción de errores en los sistemas de telegrafía arrítmica a 50 Bd**

En una serie de experimentos preliminares, se ha estudiado la relación entre la duración de las discontinuidades debidas a la conmutación y la proporción de errores en telegrafía, en los sistemas arrítmicos a 50 Bd. En pequeña medida, esta proporción depende de la naturaleza del texto transmitido. Al parecer, la proporción de errores no puede variar mucho si la duración de la discontinuidad está comprendida entre 0 y 7,5 ms aproximadamente; el valor medio del número de errores es entonces del orden de 0,25 por operación de conmutación. Si la duración de conmutación es superior a 7,5 ms, la proporción de errores aumenta. Esto se explica por el hecho evidente de que, en estas condiciones, el alargamiento o la contracción de los elementos telegráficos se acerca o excede del 50% de la duración de cada uno de ellos. Los experimentos preliminares inducen a creer que el número medio de caracteres erróneos puede ser de 1, aproximadamente, por discontinuidad para discontinuidades de 10 a 12 ms, y puede alcanzar o rebasar 2 para discontinuidades de 20 ms o más. Como se ha dicho anteriormente, estos resultados son válidos para una velocidad de modulación de 50 Bd; la duración de cada elemento es entonces de 20 ms y no es exagerado concluir que, si la discontinuidad alcanza 30 ms, puede no haber más de dos caracteres erróneos.

**3 Compensación por medio de dispositivos de corrección del retardo variable****3.1 Compensación de precisión media**

Los errores en los caracteres debidos a las discontinuidades por conmutación podrían reducirse considerablemente si en los enlaces por satélite pudiesen conectarse en tándem dispositivos de retardo de tiempo de propagación variable adecuadamente controlados, de modo que el tiempo de propagación total permaneciera constante. Para los errores en los caracteres debidos al alargamiento o a la contracción de los elementos telegráficos, bastaría con una compensación de unos 200  $\mu$ s de precisión. La puesta a punto de dispositivos de banda ancha de este género presentaría, además, la ventaja de eliminar en lo esencial las consecuencias del efecto Doppler en la banda de base transmitida; sin ellos, se necesitaría un control especial de los osciladores de transferencia de los grupos secundarios y primarios, para que las señales de telegrafía armónica quedasen bien centradas en la banda de paso de los filtros correspondientes.

Los efectos de las variaciones bruscas de fase en el momento de la conmutación subsistirían, sin embargo, y, aunque la proporción de caracteres erróneos sería inferior a la que puede esperarse en ausencia de compensación, no por ello sería menos necesario proceder experimentalmente a una evaluación precisa de su valor probable.

### 3.2 Compensación de alta precisión

Para evitar errores en los caracteres debidos a las variaciones bruscas de fase en el momento de la conmutación, parece necesario que la precisión de la compensación en la frecuencia más elevada de la banda de base corresponda a  $\pm 15^\circ$ . En el caso de circuitos telegráficos establecidos en los canales telefónicos más elevados de un sistema de 1 200 canales con frecuencias de banda de base de hasta 5 MHz, la precisión debiera alcanzar 0,01  $\mu$ s. Ahora bien, el límite probable para las predicciones de distancia de un satélite corresponde a un retardo debido a la transmisión de unos 50  $\mu$ s. En consecuencia, no es posible asegurar directamente la compensación en una sola vez, a base de predicciones con una precisión suficiente para suprimir lo esencial de los errores telegráficos. Sin embargo, podría estudiarse la posibilidad de tomar medidas adicionales, por ejemplo, la instalación de un dispositivo de control electrónico que introdujera un retardo variable hasta el instante en que las señales en las frecuencias de la banda de base recibidas de los dos satélites estuviesen en perfecta correlación en el tiempo, momento en que se efectuaría la conmutación.

Otra solución, acaso interesante, consistiría en sustituir la conmutación abrupta por una especie de desvanecimiento gradual relativamente lento. De este modo se podrían evitar los efectos esenciales de las variaciones bruscas de fase y sólo una pequeña proporción de los canales telegráficos sufriría los efectos de amplitud. Como las señales de telegrafía armónica con modulación de frecuencia pueden tolerar una reducción de nivel de por lo menos 15 dB, podría conseguirse una proporción de un carácter erróneo impreso por cada 80 000, pero esto todavía debe ser objeto de verificaciones teóricas y experimentales. Conviene, además, verificar el efecto de este desvanecimiento en los circuitos para transmisiones telefónicas, de datos y de facsímil.

## 4 Resumen de los medios de compensación

Al considerar los diversos medios a que puede recurrirse para atenuar las influencias de las discontinuidades debidas a la conmutación en la calidad de la transmisión telegráfica, hay que tener en cuenta que, en cualquier canal telegráfico, pueden existir diversas causas de errores.

El número de errores telegráficos podría reducirse mediante:

**4.1** Sistemas de memoria intermedia, que empiecen a registrar en cuanto reciban una señal de «cambio de satélite» transmitida por el sistema, y que retransmitan a velocidad ligeramente superior, una vez efectuado el cambio de satélite.

**4.2** Corrección de la discontinuidad de precisión media, aplicada en combinación con cualquiera de las medidas siguientes:

**4.2.1** Adscripción de la parte inferior del espectro de la banda de base a los canales telegráficos.

**4.2.2** Control de la conmutación de los satélites en el punto en que se efectúa la manipulación telegráfica.

**4.2.3** Introducción de un desvanecimiento gradual lento para evitar los efectos transitorios debidos a una conmutación brusca.

**4.2.4** Recodificación de la información telegráfica en códigos especiales, tales como los realizados por Hamming, que faciliten la corrección, sin obligar a una retransmisión.

**4.3** Compensación precisa de los retardos de tiempo de propagación para disminuir la discontinuidad en el momento de la conmutación.

Además, debiera ser posible utilizar un sistema ARQ u otro equivalente. Este procedimiento sería especialmente útil en caso de que el enlace por satélite estuviera prolongado por un circuito de ondas decamétricas o por cualquier otro tipo de circuito capaz de introducir un número relativamente elevado de errores telegráficos.

## ANEXO 2

### **Influencia del efecto Doppler en los interfaces digitales entre redes de satélites terrenales**

#### **1 Exposición del problema**

En los próximos años deberá generalizarse la introducción de las técnicas de transmisión digital en las redes del servicio fijo por satélite, ya que permiten una eficacia mucho mayor de utilización de los satélites que los sistemas analógicos actualmente empleados. Como contrapartida, la puesta en servicio de enlaces digitales por satélite puede muy bien crear nuevos problemas de conexión con las redes terrenales. Estas últimas son en su mayor parte analógicas, y de ahí la necesidad de prever una conversión analógico-digital. Puesto que las operaciones de conmutación en el Centro de Tránsito Internacional (CT) se realizan a nivel de canal, parece pues adecuado instalar igualmente en el mismo el equipo de conversión analógico-digital. Esto muestra claramente que en la mayoría de los casos convendrá prolongar los enlaces digitales por satélite por medio de enlaces digitales terrenales, por lo menos hasta los Centros de Tránsito Internacionales. Además, esta disposición facilitaría la integración de este enlace en la red terrenal cuando esta red pase a la explotación digital.

En situaciones en las que sea deseable mantener enlaces terrenales analógicos, podrán utilizarse transmultiplexores en la estación terrena para realizar el proceso de conversión analógico/digital. Se considera que los transmultiplexores serán económicos y proporcionarán una calidad superior a la de la alternativa consistente en demultiplexaje analógico y demodulación seguida de la codificación digital y multiplexaje.

#### **1.1 Tipos de enlaces internacionales de transmisión digital**

Al establecer redes internacionales de transmisión digital existe la probabilidad de utilizar tres tipos de enlace:

- Un enlace de transmisión digital basado en un solo canal por portadora, con facilidades de transmisión MIC-MDP-AMDF (modulación por impulsos codificados – manipulación por desplazamiento de fase – acceso múltiple por división de frecuencia). Normalmente, este enlace se explotaría a una velocidad de bits bruta de 64 kbit/s para telefonía o transmisión de datos. Podría emplearse también una relación de codificación/decodificación de 3/4 ó 7/8, conectando con la red terrenal a una velocidad de bits neta de 48 kbit/s o 56 kbit/s, si la proporción de errores para la transmisión de datos no fuese suficientemente buena.
- Un enlace de transmisión digital que utiliza fundamentalmente canales múltiplex con facilidades de transmisión MIC-MDT-MDP-AMDF; por ejemplo, un múltiplex de primer orden o de orden superior que emplee modulación MDP. Este tipo de transmisión permite transmitir una variedad de señales, como telefonía con o sin DSI (interpolación digital de señales vocales) o transmisión de datos a alta velocidad.

- Un enlace de transmisión MIC-MDP-AMDT, en que la velocidad de transmisión dentro de una ráfaga puede ser típicamente de 60 a 120 Mbit/s, aunque la velocidad de información a cualquier otro destino sería inferior. En este tipo de transmisión habrá una pequeña diferencia de velocidad entre las señales transmitidas y las recibidas, debido a los movimientos del satélite.

## **1.2 Tipos de red**

Hay tres tipos de red que requieren conexión internacional, que se consideran por su orden histórico.

### **1.2.1 Redes analógicas**

La mayoría de las redes existentes son analógicas y comprenden principalmente enlaces analógicos, pero cada vez se están utilizando más enlaces digitales en estas redes. Sin embargo, se supone que en esta clase de red el Centro de Tránsito Internacional (CT) sigue siendo analógico.

### **1.2.2 Conmutación digital en el CT, redes nacionales no síncronas**

Probablemente ésta es la próxima fase en la introducción de técnicas digitales en las comunicaciones internacionales. Es probable que en esta etapa el CT estará conectado a la estación terrena mediante enlaces digitales.

### **1.2.3 Redes nacionales síncronas interconectadas mediante enlaces digitales**

Esto incluirá también redes nacionales que utilizan relojes de alta estabilidad y que están conectadas plesiócronamente. Se espera que ésta ha de ser la configuración de red última prevista por el UIT-T.

Debe tenerse en cuenta que la configuración que comprende redes mixtas tendrá que coexistir.

## **1.3 Interconexión de enlaces digitales temporizados por diferentes relojes**

Al transmitir un tren digital procedente de un enlace digital por un segundo enlace digital, los relojes que controlan el tren del primer enlace digital y del segundo enlace pueden tener diferencias de temporización, que deben compensarse, de modo que la información pueda pasar al segundo enlace.

Pueden utilizarse dos métodos para lograr esta compensación y así interconectar enlaces digitales que tienen diferentes ritmos de reloj. El primero consiste en aplicar deslizamientos de tramas (es decir, de vez en cuando no se transmite una trama o se transmite dos veces seguidas), y el segundo utiliza la justificación.

Si se utiliza la técnica de deslizamientos de trama, deberán establecerse límites a la frecuencia de deslizamiento de trama. En telefonía MIC podrían tolerarse varios deslizamientos por minuto, mientras que algunos tipos de servicios de datos no podrán tolerar más de uno o dos deslizamientos por día en una conexión de usuario a usuario.

Puesto que la frecuencia de deslizamiento es proporcional a la diferencia entre las frecuencias de reloj a través del interfaz, los relojes de enlaces independientes deberán mantenerse dentro de estrechas tolerancias de exactitud y estabilidad, de manera que los enlaces sean casi síncronos. Una conexión entre dos redes de este tipo casi síncrono se denomina conexión plesiócrona.

La segunda solución consiste en ofrecer por el segundo enlace una velocidad de bits ligeramente superior a la del tren digital. La diferencia se compensa añadiendo bits de justificación que deben extraerse después («desjustificados») en el extremo distante del segundo enlace, haciéndolo efectivamente transparente y la velocidad binaria media de salida después de la desjustificación, es la misma que la velocidad binaria media de entrada antes de la justificación. Aunque no ocurran deslizamientos en el interfaz entre el primer enlace y el enlace justificado, podrán aparecer deslizamientos en el interfaz entre el extremo desjustificado del segundo enlace y un tercer enlace si la frecuencia de reloj del tercer enlace difiere de la del primer enlace.

El retardo de propagación en una dirección del trayecto de transmisión a través de un satélite geoestacionario puede tener una variación cíclica diaria cresta a cresta del orden de 0,15 a 1,5 ms, debido a las perturbaciones orbitales. La deriva longitudinal del satélite alrededor de su posición nominal puede causar variaciones cíclicas adicionales a largo plazo del mismo orden de magnitud aproximadamente. Estas variaciones producen una desviación Doppler de la frecuencia del reloj del enlace por satélite que puede ser absorbida en las estaciones terrenas, en transmisión o en recepción, según los casos de aplicación, mediante el empleo de memorias intermedias reguladoras o tampón. Para asegurar la conversión entre dos velocidades de bits ligeramente diferentes, las señales se registran en una memoria a la velocidad de recepción y se leen a la velocidad de transmisión. Si la velocidad de transmisión es mayor que la de recepción, la memoria tenderá a vaciarse y, en caso contrario, a llenarse. Al ser limitados los movimientos del satélite, ambos se presentarán alternadamente, y su media en el tiempo será nula. Dimensionando convenientemente la capacidad de la memoria podrían absorberse sin pérdida de información ni repetición las variaciones extremas de velocidad.

En último término, se necesitará un enlace digital por satélite internacional para interconectar dos o más redes digitales terrenales independientes.

Si la temporización del enlace por satélite está alineada con el reloj de alta estabilidad de una de las redes (red A), no se producirá ningún deslizamiento adicional en las conexiones entre la red A y las otras redes, a condición de que el desplazamiento Doppler se compense mediante memorias intermedias elásticas en el interfaz, pero sí se producirán deslizamientos adicionales en conexiones entre las otras redes. Si la temporización del enlace por satélite es independiente, se producirán deslizamientos adicionales, a menos que se utilice justificación en el interfaz del enlace por satélite con las redes terrenales. El empleo de tal enlace con justificación no afectará a la tasa de deslizamientos neta que resulta de las diferencias entre los relojes de las dos redes.

Debe señalarse que el componente de error de temporización debido a la variación del tiempo de propagación del enlace por satélite reaparecerá después del punto en el cual se realiza la desjustificación, y, para compensarlo, será aún necesario la memoria intermedia elástica. También ha de tenerse en cuenta que, si se utiliza la justificación, se limitará el funcionamiento de los enlaces multidestino y la técnica de interpolación DSI.

## **2 Examen de las soluciones**

### **2.1 Redes nacionales analógicas con conmutación**

No se considera conveniente la conversión analógico-digital en las estaciones terrenas, debido a que sería necesario incluir equipo de multiplexado adicional en el Centro de Tránsito Internacional (CT), evidentemente sería mejor que el enlace CT-estación terrena fuese también digital. Sin embargo, como la red terrenal es principalmente analógica y, por tanto, no se utiliza la conmutación digital en

el CT, la velocidad del reloj del enlace digital no es crítica. Por consiguiente, para sistemas MDP entre puntos fijos, debería ser posible controlar la velocidad de transmisión digital de la parte terrenal de recepción del enlace a partir de un reloj derivado en la estación terrena. Este reloj se originaría a partir del reloj del extremo de transmisión del equipo de codificación del CT distante y, en el caso de sistemas AMDT, del reloj de referencia de trama de la estación de referencia. Es probable que el desplazamiento por efecto Doppler debido al movimiento del satélite sea insignificante. Sin embargo, si ha de eliminarse completamente el deslizamiento, será necesario absorber la variación de reloj debida al desplazamiento por efecto Doppler mediante memorias reguladoras en el extremo de recepción del enlace. Con esta solución se evitará la pérdida de información digital. La utilización de la DSI en sistemas AMDT no afecta a esta solución.

## 2.2 Conmutación digital en el CT con redes nacionales no síncronas

En este caso, generalmente habrá una pequeña diferencia de velocidad entre el reloj que controla al conmutador en el CT y las señales digitales que llegan a ese CT. Consiguientemente, habrá que prever deslizamientos de trama. No tendría mayor sentido, en este caso, tratar de evitar los deslizamientos de trama una vez más en el interfaz de la estación terrena. Suponiendo en el CT un reloj con una precisión de  $1 \times 10^{-8}$  y en la estación de referencia del AMDT un reloj con una precisión de  $1 \times 10^{-7}$ , habrá un solo deslizamiento de trama MIC de  $125 \mu\text{s}$  cada 19 min si el satélite se encuentra en una órbita geoestacionaria ideal, y cada 12 min si el satélite tiene una inclinación de órbita de  $3^\circ$  y no posee una memoria, intermedia reguladora para eliminar las variaciones de retardo de transmisión.

En estos casos, por consiguiente, el «equipo de interfaz digital directa» (EIDD) sólo tendrá una función respecto de la alineación y del deslizamiento de trama, encargándose asimismo de efectuar cualquier modificación necesaria del formato de trama (tal como se describe en el § 2.1). En el caso de los satélites sin un control de la inclinación de órbita, probablemente el EIDD tendrá que contener asimismo una memoria intermedia reguladora para eliminar las variaciones de retardo de transmisión.

## 2.3 Conmutación digital con redes nacionales síncronas

El UIT-T ha recomendado que el interfuncionamiento de redes nacionales síncronas sea plesiócrono. Si las redes nacionales están controladas con una precisión de  $1 \times 10^{-11}$ , el resultado será un mínimo de 70 días entre un deslizamiento de trama y otro.

Cuando la conexión internacional se efectúa mediante un sistema por satélite AMDT cuyo reloj de referencia tiene una precisión muy inferior a  $1 \times 10^{-11}$ , la frecuencia de los deslizamientos de trama tendrá que ser mucho mayor que 1 cada 70 días o se podrá recurrir a un EIDD con justificación. No obstante, se podría evitar esta complicación si el propio sistema AMDT estuviese temporizado con una precisión comparable a la de las redes nacionales, es decir,  $1 \times 10^{-11}$ . En ese caso, el EIDD tendrá que efectuar la función de alineación, realizar cualquier modificación necesaria del formato y eliminar las variaciones de retardo de transmisión debidas al desplazamiento del satélite, mediante la utilización de memorias intermedias reguladoras en los lados de transmisión y recepción del enlace. Es por ello que resulta la solución preferida para interconexión de redes nacionales síncronas.

Por tanto, como en la práctica sólo un número relativamente reducido de estaciones terrenas tienen que actuar como estaciones de referencia en los sistemas AMDT, no sería difícil lograr que esos sistemas alcanzasen la precisión de temporización requerida si se permite que los países que tienen redes digitales síncronas sirvan como estaciones de referencia. Sin embargo, en el caso de los sistemas AMDT/CS (con conmutación a bordo del satélite) cuya introducción en las redes internacionales por satélite se espera en un próximo futuro, puede ser difícil el funcionamiento plesiócrono del sistema AMDT si la secuencia de conmutación del satélite no está controlada desde tierra. Inicialmente, cuando los países con redes síncronas sean aún muy pocos, quizá sea necesario que los sistemas AMDT tengan una precisión de temporización menor y que el deslizamiento de trama ocurra con mayor frecuencia, quizá una vez al día. Pese a todo esto, es preferible que un sistema de satélites internacionales AMDT o AMDT/CS se diseñe para que funcione de modo plesiócrono entre las redes digitales terrenales que interconecta.

---

