

INFORME 962-2

**FILTRADO, MUESTREO Y MULTIPLAJE PARA LA CODIFICACIÓN
DIGITAL DE LAS SEÑALES DE TELEVISIÓN EN COLOR**

(Cuestión 25/11, Programa de Estudios 25H/11)

(1982-1986,-1990)

1. Introducción

El Informe 629 contiene una breve introducción concerniente a la anchura de banda y al muestreo, en su relación con el proceso de codificación de señales en forma digital.

Con el fin de que la velocidad binaria total de la señal digital no sea excesiva, es necesario evidentemente determinar las anchuras de banda de las señales de luminancia y de diferencia de color adecuadas para proporcionar señales de radiodifusión de gran calidad (que pueden encontrarse en la forma analógica compuesta). Además, al considerar el filtrado y el muestreo de las señales componentes, es preciso tener también en cuenta que se han formulado propuestas con miras a utilizar tales señales en forma digital para fines en que las exigencias podrían ser mayores que para la radiodifusión clásica (véase el punto 2.3). En particular se debe prestar atención a los condicionamientos impuestos por las modernas técnicas de producción de programas, teniendo en cuenta el margen de calidad exigido por la creciente demanda de operaciones de procesamiento de la imagen [Akrich y Zaccarian, 1981].

Al elegir los parámetros de muestreo que han de aplicarse a las señales componentes, no hay duda de que las frecuencias de muestreo están estrechamente relacionadas con las anchuras de banda de las señales componentes, pero hay otros parámetros que dependen de la estructura o estructuras de muestreo de la imagen (véase el punto 3).

En el punto 4 se trata del número de bits necesarios para describir cada muestra.

Con el fin de manejar un solo tren de bytes en el estudio cuando se utiliza la codificación de las componentes, se requiere el multiplaje en el tiempo de los tres trenes de bytes. En el punto 5 se trata de algunos procedimientos posibles.

2. Anchuras de banda

En los puntos 2.1 y 2.2 se describen los resultados de pruebas subjetivas destinadas a establecer respectivamente las anchuras de banda de la señal de luminancia y de las señales de diferencia de color. En el punto 2.3 se analizan las implicaciones con respecto a esas anchuras de banda, teniendo en cuenta las necesidades de las operaciones de procesamiento de las señales en los estudios.

2.1 Anchura de banda de la señal de luminancia

En [CCIR, 1978-82a y b] se exponen los resultados de pruebas realizadas por miembros de la UER, para determinar la relación entre la calidad subjetiva y la anchura de banda de la componente de luminancia, utilizando un sistema de 625 líneas y una pantalla monocroma. Las pruebas se realizaron con un método descrito en el Informe 405, aplicando la escala de degradación e imágenes ligeramente más críticas que la media, de acuerdo con las exigencias de la Recomendación 500.

La conclusión principal a que se llega es que la limitación de la anchura de banda (entre puntos a -3 dB) a 4,5 MHz utilizando filtros de paso bajo de corte abrupto introduce una degradación imperceptible para el 50% de los observadores situados a una distancia de observación equivalente a 4 veces la altura de la imagen (véase la fig. 1a). Los resultados indican que los efectos de los filtros en imágenes generadas electrónicamente son menos críticos que en las demás imágenes. Estos estudios no han mostrado las ventajas esperadas de la utilización de un filtro en peine (con el muestreo sub-Nyquist), en comparación con un filtro de paso bajo que corta a la mitad de la frecuencia de muestreo.

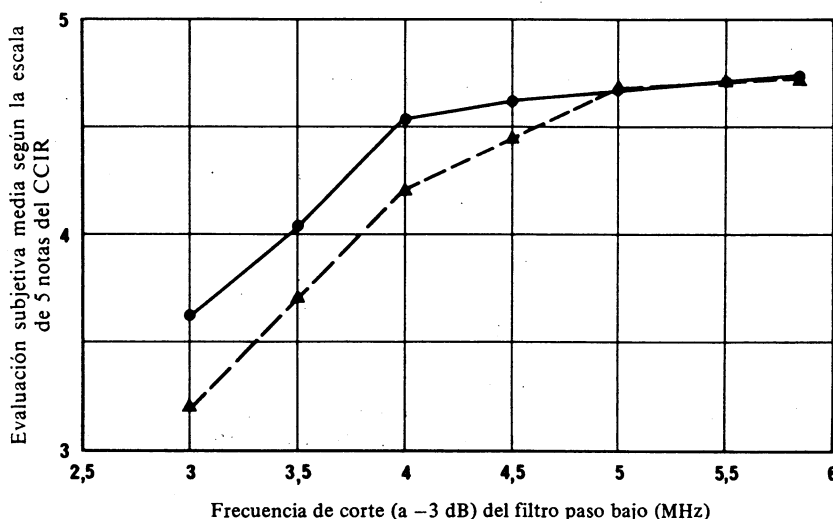


FIGURA 1a — Filtrado paso bajo.
Valores medios de los resultados obtenidos en siete laboratorios utilizando imágenes de prueba de 625 líneas

- observadores situados a una distancia igual a 6 veces la altura de la imagen
- ▲— observadores situados a una distancia igual a 4 veces la altura de la imagen

Los resultados obtenidos en estas pruebas subjetivas de la UER han sido analizados de acuerdo con el método descrito en el anexo III del Informe 405 y este análisis se describe en el documento [CCIR, 1978-82c]. El resultado del análisis se presenta en la fig. 1b. En el mismo documento se analiza el efecto notable de la elección de las señales imagen de prueba y la gran dispersión de los resultados que puede producirse si no se sigue la Recomendación 500. Se expresa también la opinión de que un criterio de degradación de $I = 0,05$ (que corresponde a la nota 4,8 en una escala de cinco notas) es apropiado y que por consiguiente la anchura de banda mínima de la señal de luminancia debe ser de 5,8 MHz.

Pruebas realizadas en Polonia y descritas en [CCIR, 1978-82d] indican que la anchura de banda de la señal de luminancia no debe ser inferior a 4,5 MHz en los sistemas de 625 líneas.

En [CCIR, 1978-82e] se describen los trabajos realizados por la URSS, que concluye que la anchura de banda apropiada de la señal de luminancia es de 6,0 MHz.

La relación entre la calidad de imagen y la anchura de banda de la señal de luminancia en los sistemas de 525 líneas ha sido estudiada en Japón [CCIR, 1978-82f]. Se han realizado pruebas separadas, utilizando imágenes de color, de dos diferentes valores de la anchura de banda de la señal de diferencia de color; los filtros utilizados en los canales de luminancia y de diferencia de color eran tipo Thomson (es decir, de corte relativamente lento). Los resultados de las pruebas indican la idoneidad de una anchura de banda de la señal de luminancia de 5,6 MHz.

2.2 Anchura de banda de las señales de diferencia de color

Pruebas hechas en Polonia [CCIR, 1978-82d] indican que en los sistemas de 625 líneas la anchura de banda de cada señal de diferencia de color no debe ser inferior a 1,5 MHz (resultado que concuerda con el expuesto por la URSS en [CCIR, 1978-82e]).

Los trabajos descritos en [CCIR, 1978-82f], incluyen también pruebas para determinar la anchura de banda de la señal de diferencia de color adecuada para los sistemas de 525 líneas. La relación entre la calidad de la imagen y la anchura de banda de la señal de diferencia de color se determinó mediante pruebas separadas, utilizando imágenes de color, con dos valores diferentes de la anchura de banda de la señal de luminancia. Los resultados permitieron llegar a la conclusión de que la anchura de banda de la señal de diferencia de color debe tener un valor aproximado de 2,8 MHz (fig. 2).

Experimentos realizados en Francia [Sabatier y Sallio, 1981; Sabatier y Chatel, 1981], muestran resultados muy similares para los sistemas de 625 líneas.

Se describen en [CCIR, 1978-82g] algunas investigaciones encaminadas a establecer la característica óptima para limitar la anchura de banda de las señales de diferencia de color. Estos estudios, realizados en la República Federal de Alemania, parten de la base de que la máxima anchura de banda disponible (límite Nyquist) era de 2,0 MHz.

En [CCIR, 1978-82h] se describen estudios sobre pruebas subjetivas realizadas para determinar las características óptimas de un filtro con una anchura también de 2,0 MHz.

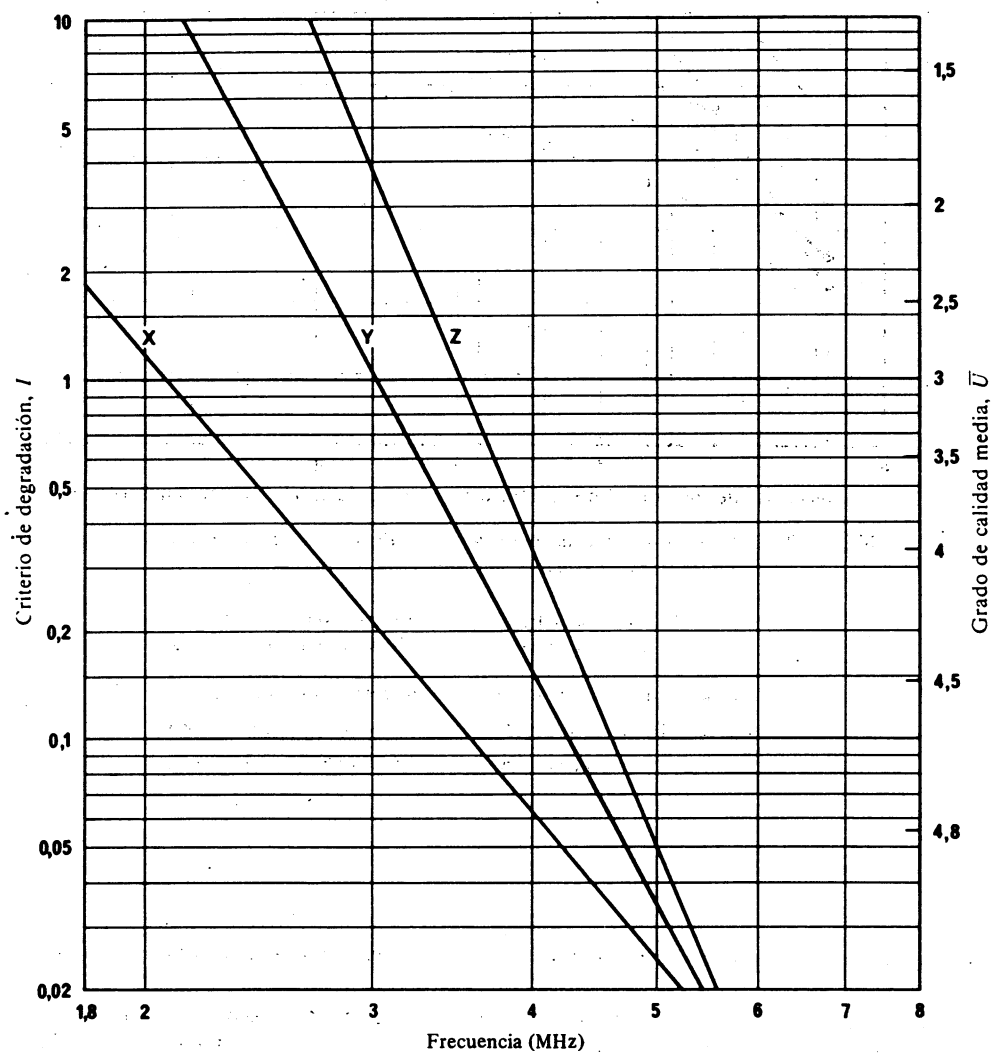


FIGURA 1b — Características de degradación para una anchura de banda reducida, de acuerdo con los experimentos realizados por la UER: dispersión de los resultados obtenidos por diferentes laboratorios. La distancia de observación es de 4 veces la altura de la imagen

Curvas X: laboratorio A (la menos crítica)
 Y: media de los resultados de 7 laboratorios
 Z: laboratorio B (la más crítica)

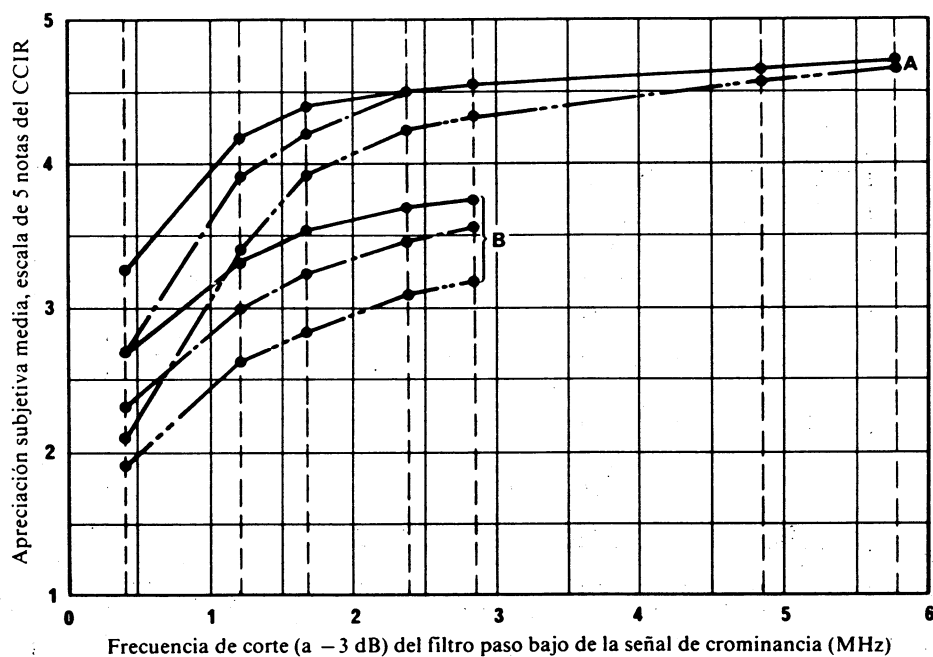


FIGURA 2 — Relación entre la anchura de banda de la señal de diferencia de color y la calidad de imagen (sistemas de 525 líneas)

Curvas A: anchura de banda (a -3 dB) de la señal Y: 5,8 MHz
 B: anchura de banda (a -3 dB) de la señal Y: 2,9 MHz

— Distancia de observación de 6 veces la altura de la imagen
 - - - Distancia de observación de 4 veces la altura de la imagen
 - · - · Distancia de observación de 2,5 veces la altura de la imagen

2.3 Requisitos de anchura de banda para aplicaciones de procesamiento de la señal en los estudios

Debe tenerse en cuenta que los valores de la anchura de banda de la señal de luminancia expuestos en los puntos 2.1 y 2.2 son los que se consideran convenientes al considerar la cadena general de la señal antes del emisor de radiodifusión. En [CCIR, 1978-82i] se examina la necesidad de mayores anchuras de banda de las señales de luminancia y de diferencia de color al considerar el procesamiento de la señal en el estudio. Se indica en primer lugar que la anchura de banda de la señal de luminancia debe ser suficiente para permitir que las imágenes sufran cierto grado de recomposición sin que se observe una degradación perceptible de la imagen de salida. En segundo término, [CCIR, 1978-82i] mantiene que las anchuras de banda de las señales de diferencia de color deben ser suficientes para permitir la obtención de excelentes resultados con los dispositivos de incrustación. En [CCIR, 1978-82h] se examinan también las necesidades de anchura de banda de la señal de diferencia de color en el contexto del proceso de incrustación. Expresa la opinión de que una frecuencia de muestreo de la señal de diferencia de color de 6 a 7 MHz (la mitad de la usada para la señal de luminancia) es satisfactoria tanto en lo que se refiere a la calidad de la imagen como a los requisitos del proceso de incrustación, siempre que la característica de filtrado muestre una atenuación de 12 dB en la mitad de la frecuencia de muestreo; además, las frecuencias en las que los valores de la atenuación son de 12 dB y 3 dB deben guardar la relación de 1,25 : 1.

Se ha estudiado en Italia el problema general de diseño de los filtros de conformación utilizados en la codificación digital de señales de televisión [CCIR, 1978-82j]. Se utilizaron simulaciones de computador para estudiar la influencia de diversos parámetros de diseño en la amplitud de las sobreoscilaciones en el grado de aparición de componentes espectrales de repliegue.

En [CCIR, 1982-86a] se informa de los experimentos realizados en la República Popular de Polonia sobre las características preferidas de filtrado de luminancia para un medio en que se utiliza una anchura de banda de luminancia de 6 MHz para sistemas compuestos convencionales. Se sugieren una banda de paso de 6 MHz, una tolerancia de pérdida de inserción de $\pm 0,05$ dB, una atenuación de 15 dB en 6,75 MHz y de 40 dB en 7,5 MHz.

El documento [CCIR, 1982-86b] da cuenta de estudios realizados en la URSS, según los cuales, teniendo en cuenta las circunstancias anteriormente mencionadas y consideraciones de diseño prácticas adicionales, se propone una banda de paso de 5,75 MHz, una tolerancia de pérdida de inserción de 0,1 dB, una atenuación de 20 dB en 6,75 MHz y de 40 dB en 7,5 MHz para el filtro de luminancia.

En Italia [CCIR, 1982-86c], se ha realizado un estudio, mediante simulación por computador, de las características de prefiltrado y postfiltrado basadas en la reducción al mínimo de la influencia ponderada de las sobreoscilaciones y el repliegue del espectro. De este estudio se derivan valiosos datos preliminares que redundan subsiguientemente en apoyo de las características de filtrado de las señales de luminancia y de diferencia de color mencionadas en [CCIR, 1982-86d].

Un cuidadoso estudio sobre la calidad de funcionamiento de una cadena de codecs MIC en cascada [CCIR, 1982-86e, f; Devereux, 1982] ha demostrado que después de reducir al mínimo las deficiencias instrumentales de los codecs, la degradación más importante que persiste y puede eliminarse se debe a las respuestas en amplitud y fase de la banda de paso de los filtros previos y posteriores analógicos, por lo que, en los documentos anteriormente mencionados, se formulan propuestas sobre las características de estos filtros.

La OIRT [CCIR, 1982-86g] ha estudiado la proposición de utilizar una frecuencia de corte de 5,75 MHz para la señal de luminancia de la norma digital 4 : 2 : 2. Este valor se aproxima más al de la frecuencia de corte de 6 MHz para las señales video especificado por las normas D, K, K1 y L (véase el Informe 624). Se está también estudiando el valor de 6 MHz para el filtro de banda limitada.

Basándose en los resultados de los estudios anteriormente mencionados y en el examen de los problemas que entraña la realización práctica de filtros eficaces que satisfagan las necesidades de todas las administraciones, se han especificado las características indicadas en la fig. 1 del anexo III a la Recomendación 601.

Se ha continuado el anterior estudio [CCIR, 1982-86d, f; Devereux, 1984] para determinar las especificaciones de los filtros para las señales de diferencia de color para la norma de codificación de relación 4 : 2 : 2 de la Recomendación 601. En estos estudios se ha dedicado especial atención a:

- a) la necesidad de conseguir las máximas anchuras de banda utilizables tanto para las señales de luminancia como para las de diferencia de color;
- b) la necesidad de garantizar unas degradaciones despreciables como consecuencia de las tolerancias en la banda de paso, cuando se disponen en cascada un cierto número de parejas de filtros en una cadena de transmisión;
- c) completando el punto b) anterior, la necesidad de evitar valores y tolerancias innecesariamente restrictivos;
- d) la necesidad de unas especificaciones para filtros tanto analógicos como digitales que los fabricantes puedan satisfacer a un coste razonable.

Como resultado de estos estudios, se presenta en la fig. 2 del anexo III a la Recomendación 601, la especificación de los filtros analógicos para señales de diferencia de color muestreadas a 6,75 MHz. En la fig. 3 del anexo III a la Recomendación 601, se indica la especificación del correspondiente filtro digital para la conversión de la frecuencia de muestreo entre señales muestreadas a 13,5 MHz y a 6,75 MHz.

En los puntos que siguen, se dan algunas indicaciones sobre la aplicación práctica de los filtros recomendados en el anexo III a la Recomendación 601.

En las propuestas para los filtros utilizados en los procesos de codificación y decodificación, se ha supuesto que se introduce la corrección de la característica (sen x/x) en los filtros que van a continuación de los convertidores digital a analógico. Las tolerancias en la banda de paso del filtro, más el corrector de (sen x/x), más la característica teórica (sen x/x) y el igualador de retardo se consideran una sola unidad.

Los retardos totales debidos al filtrado y a la codificación de las componentes de luminancia y de diferencia de color deben ser los mismos. El retardo en el filtro de diferencia de color (fig. 2 del anexo III a la Recomendación 601) es el doble del correspondiente al filtro de luminancia (fig. 1 del anexo III a la Recomendación 601). Como resulta difícil igualar estos retardos utilizando redes analógicas de retardo sin exceder las tolerancias de la banda de paso, se recomienda igualar el conjunto de las diferencias de retardo (en múltiplos enteros del periodo de muestreo) en el dominio digital. Al corregir cualquier resto, debe observarse que el circuito de muestreo y mantenimiento del decodificador introduce un retardo uniforme igual a la mitad del periodo de muestreo.

Se reconoce que las tolerancias en la banda de paso para el rizado de amplitud y el retardo de grupo son muy estrictas. El estado actual de los estudios indican que es necesario que se pueda llevar a cabo un número significativo de operaciones de codificación y decodificación en cascada sin sacrificar la calidad potencialmente elevada de la norma de codificación 4 : 2 : 2. Debido a las limitaciones de las características de los equipos de medición actualmente disponibles, puede que los fabricantes tengan dificultades para verificar de forma económica el cumplimiento de las tolerancias de cada uno de los filtros durante la producción. No obstante, es posible diseñar filtros de forma que se cumplan las características especificadas en la práctica, y se pide a los fabricantes que hagan todos los esfuerzos durante el proceso de fabricación para que el ajuste de cada filtro cumpla las máscaras correspondientes.

Se realizaron en Japón evaluaciones subjetivas del umbral de visibilidad para las oscilaciones parásitas de la señal de color. Los resultados revelan que el umbral de visibilidad se alcanza en un 2,5% o menos, para cartas de ajuste y caracteres generados electrónicamente, y en un 5% o más para imágenes generales. Sobre la base de los resultados de las evaluaciones, se diseñó un filtro de conformación de la señal de color, para el que la perturbación total debida a las oscilaciones parásitas y a la distorsión por repliegue del espectro era inferior al 2,5%. Esta característica puede obtenerse mediante un filtro transversal digital [CCIR, 1982-86h].

Las especificaciones recogidas en el Anexo III de la Recomendación 601 se determinaron para salvaguardar en la medida de lo posible el contenido espectral de las señales Y , C_R y C_B a lo largo de la cadena de señales componentes. No obstante, se reconoce que las características espectrales de diferencia de color deben conformarse con un filtro de caída lenta, insertado en los monitores de imagen o al final de la cadena de señales componentes.

2.4 Anchura de la banda y filtrado para la conversión entre las distintas frecuencias de muestreo

En [CCIR, 1986-90a] se examinan las características de filtrado e interpolación digitales necesarios para el interfaz entre las señales de relación 4:2:2 de la Recomendación 601 y las señales con frecuencias de muestreo inferiores, y se ofrecen ejemplos de filtros de complejidad media, diseñados para conservar el contenido de información. Sólo se considera el filtrado horizontal.

En [CCIR, 1986-90b] se describen las pruebas subjetivas efectuadas utilizando dichas características simuladas por computador. Se vio que para las imágenes naturales los efectos del submuestreo son más visibles en las zonas coloreadas, si bien se obtuvo cierta degradación mediante el submuestreo de la componente de luminancia de las imágenes generadas electrónicamente. Esta conclusión lleva a considerar el submuestreo en tresbolillo para las señales de crominancia.

3. Parámetros de muestreo

El proceso de muestreo está determinado por tres factores fundamentales:

- la estructura de muestreo, es decir, la posición relativa de las muestras en el espacio y en el tiempo;
- el número de muestras por línea;
- el proceso de filtrado, que puede ser unidimensional, bidimensional o tridimensional.

La estructura de muestreo citada anteriormente puede ser repetitiva o no repetitiva de imagen a imagen. Igualmente, el número de muestras por línea puede ser constante o no constante de una línea a otra. En todos los ejemplos indicados a continuación, los esquemas de muestreo eran estables de imagen a imagen.

En [Kretz y Sabatier, 1981] se muestra un estudio general sobre la materia.

En [CCIR, 1978-82d] se hacen algunas comparaciones entre esquemas de muestreo ortogonal y al tresbolillo, las cuales indican que el esquema ortogonal tiene algunas ventajas.

3.1 *Velocidades de muestreo*

La UER ha estudiado el problema de definir una serie normalizada de parámetros esenciales de codificación para equipos de estudio de televisión con cuatro objetivos principales:

- eliminar, en la zona de producción, las diferencias entre los sistemas existentes de 625 líneas;
- lograr una calidad de imagen técnica tan elevada o más que la que pueda obtenerse con buenos sistemas modernos que utilicen técnicas analógicas;
- asegurar de que la norma es adecuada para la tecnología utilizable actualmente o de la que pueda disponerse en un futuro próximo y;
- definir valores de los parámetros que tengan en cuenta las necesidades de procesamiento de la imagen en el estudio.

En una primera serie de estudios [CCIR, 1978-82k] se empleó el muestreo ortogonal con velocidades de muestreo de 768 veces la frecuencia de barrido horizontal (f_H) para la señal de luminancia, y $256 f_H$ para las señales de diferencia de color; las cuatro muestras de diferencia de color coincidían espacialmente, y cada par de muestras de diferencia de color coincidía espacialmente con una muestra de luminancia.

Estos estudios pusieron de relieve la necesidad de nuevos trabajos, referentes en particular a la influencia de los requisitos de procesamiento de la imagen en la elección de las velocidades de muestreo.

Los parámetros de muestreo examinados en [CCIR, 1978-82k] se analizan en [CCIR, 1978-82l] con respecto a su idoneidad para la transmisión de la señal digital a una velocidad de 140 Mbit/s. Se expresa la opinión de que las señales basadas en estos parámetros de muestreo serán de calidad superior a las proporcionadas actualmente por transmisiones analógicas.

La UER ha realizado también otra serie de estudios referentes a velocidades de muestreo. Se incluyen en este trabajo experimentos para evaluar la calidad de la imagen disponible utilizando diversos valores de la serie de parámetros que va de 12 : 4 : 4 a 14,3 : 7,15 : 7,15, en la que el número de estas relaciones corresponde a las frecuencias de muestreo (en MHz) utilizadas para la señal de luminancia y para las dos señales de diferencia de color respectivamente. Aparte de la serie 12 : 4 : 4, todas las series de parámetros evaluadas tienen una relación de 2 : 1 entre la frecuencia de muestreo de la señal de luminancia y de las señales de diferencia de color. En [CCIR, 1978-82m; UER, 1981] se describen estas investigaciones y analizan los resultados obtenidos con cada uno de los valores de las series de parámetros, con respecto a cierto número de atributos.

En primer lugar, en cuanto a la calidad de imagen obtenida después de una conversión analógica *RGB* a digital *YUV*, los resultados indican en términos generales que la gama de parámetros 12 : 6 : 6 da unos resultados bastante mejores que la gama 12 : 4 : 4. Sin embargo, indican también que la calidad de la gama 14,3 : 7,15 : 7,15 a este respecto no es significativamente mejor que la obtenida utilizando la gama 12 : 6 : 6.

En segundo lugar, con relación a la calidad de las incrustaciones obtenidas, los resultados indican que si bien la gama 12 : 6 : 6 proporciona una calidad mayor que la gama 12 : 4 : 4, puede advertirse una mejora relativamente constante de la calidad a medida que las frecuencias de muestreo de luminancia y de diferencia de color van aumentando hasta su valor máximo, es decir, conforme a la gama 14,3 : 7,15 : 7,15.

En tercer lugar, se concluyó que en pruebas realizadas después de una expansión horizontal de la imagen no se observaban componentes espectrales de repliegue utilizando imágenes de prueba naturales generadas no electrónicamente, para todas las frecuencias de muestreo de la señal de luminancia de la gama 12 : 6 : 6 a 14,3 : 7,15 : 7,15. Por el contrario, en una señal generada electrónicamente con barrido de frecuencia horizontal, los componentes espectrales de repliegue disminuían al aumentar la frecuencia de muestreo, siendo la disminución máxima en la gama 12 a 13 MHz.

k Finalmente, con respecto a la reducción de la velocidad binaria los estudios demuestran que es posible reducir la velocidad binaria de una señal de las series 14,3 : 7,15 : 7,15 de manera que no se excedan los 140 Mbit/s, sin afectar a la calidad de la imagen o a la capacidad potencial de procesamiento de las incrustaciones.

Algunos de los estudios mencionados derivan de trabajos realizados en el Reino Unido que se describen con todo detalle en [CCIR, 1978-82n]. En estos trabajos se incluyen pruebas sobre dos subseries de parámetros a fin de investigar las propiedades de sistemas que posiblemente se califiquen como niveles inferiores de la familia de normas compatibles de codificación digital. En una de estas subseries las frecuencias de muestreo de las señales de luminancia y de diferencia de color utilizadas estaban en la relación de 4 a 1.

Las pruebas subjetivas relacionadas con este trabajo se realizaron utilizando el método del «doble estímulo» descrito en el apéndice I a la Recomendación 500 y las imágenes de referencia derivadas por codificación digital de las señales de entrada de acuerdo con la serie de parámetros 14,3 : 14,3 : 14,3. Los resultados detallados de las pruebas subjetivas mencionadas han sido analizados por el método descrito en el anexo III al Informe 405 y los resultados del análisis, descritos en [CCIR, 1978-82o], se dan en términos del índice de degradación y de la nota media \bar{U} . Del análisis ha de concluirse que con respecto a la calidad básica de la imagen la serie de parámetros 13,5 : 6,75 : 6,75 se caracteriza por un índice de degradación I de 0,03 (a 4 H) y una nota media superior a 4,8 y que los resultados correspondientes relativos a la calidad de las incrustaciones son $I = 0,3$ y $\bar{U} = 4,0$.

En la URSS, se han estudiado los parámetros de muestreo adecuados para las normas D y K. Los trabajos iniciales comprendían el estudio de un sistema en el que el muestreo de la señal de luminancia se efectuaba ortogonalmente a una velocidad de $800 f_H$ (12,5 MHz), y el muestreo de cada una de las señales de diferencia de color se efectuaba de modo semejante a $200 f_H$ (3,125 MHz); la investigación se describe en [CCIR, 1978-82e]. En estudios que se describen en [CCIR, 1978-82p], se revisaron los parámetros de muestreo para estudios de televisión digital y se estimó conveniente aumentar las frecuencias de muestreo hasta unos 13 a 13,5 MHz y 6,5 a 6,75 MHz para las señales de luminancia y de diferencia de color, respectivamente.

En [CCIR, 1978-82q], se comunican los resultados de las pruebas subjetivas detalladas que se realizaron con el fin de determinar la relación entre la calidad de la imagen de color reproducida y las frecuencias y estructuras de muestreo utilizadas para las señales de luminancia y de diferencia de color.

En [CCIR, 1978-82r], se describe una norma, que formará parte de la familia de normas de codificación digital por debajo de la recomendada como norma principal para estudios. En esta norma, el muestreo de la señal de luminancia se efectúa a 10,125 MHz y la anchura de banda útil se extiende hasta 5 MHz. Las señales de diferencia de color se muestrean a una frecuencia igual a 3,375 MHz, y tienen una anchura de banda de 1,5 MHz. Se necesitan nuevos estudios para elegir la mejor estructura de muestreo para este sistema. El sistema se conoce como sistema 3 : 1 debido, en primer lugar, a las relaciones especiales utilizadas para calcular las frecuencias de muestreo a partir de las frecuencias recomendadas para la norma principal para estudios y, en segundo lugar, a la utilización de codificación secuencial en línea de las señales de diferencia de color. Se afirma que la calidad de imagen obtenida con este sistema es igual o mejor que la obtenida utilizando un códec PAL analógico corriente.

En [CCIR, 1982-86i, Wengenroth, 1982] se describe un sistema para la codificación de una señal de televisión a una velocidad binaria de 70 Mbit/s utilizando el método MCD (cuantificación plegada con 5 bit/muestra). Las frecuencias de muestreo para las señales de luminancia y de diferencia de color se derivan de la norma para estudios por medio de un filtro digital que produce una conversión de la frecuencia de muestreo de relación 6 : 5. La transmisión secuencial en línea está prevista para las dos señales de diferencia de color.

En Estados Unidos, se realizaron pruebas objetivas detalladas utilizando un método descrito en el Informe 405, anexo IV, con señales componentes codificadas en forma digital, de conformidad con la norma de 525 líneas; estas pruebas se describen en [CCIR, 1978-82s; SMPTEJ, 1981]. Las pruebas comprendieron velocidades de muestreo de la señal de luminancia correspondientes a 768, 864 y 912 muestras por línea completa, y relaciones entre la anchura de banda de la señal de luminancia y la de la señal de diferencia de color de 4 : 4 : 4, 4 : 2 : 2, 4 : 1 : 1 y 2 : 1 : 1. Se realizaron pruebas sobre la calidad básica de la imagen y sobre las propiedades de las diversas series de parámetros por lo que respecta a los procesos de producción, tales como ampliación de la imagen, incrustación, registro digital de copias múltiples y decodificación/codificación digital de las señales compuestas de color del sistema M de NTSC.

Estas pruebas confirmaron la selección de la serie de parámetros 4 : 2 : 2 como preferibles para una norma de estudio y mostraron que se obtenía una pequeña pero creciente mejora de la calidad de la imagen con el aumento de la velocidad de muestreo.

En Japón se realizaron pruebas subjetivas, con series de parámetros de muestreo semejantes, que se describen en [CCIR, 1978-82t]. Estas pruebas comprendían un proceso de incrustación digital para series de parámetros con frecuencias de muestreo de la señal de luminancia de 12,1, 13,6 y 14,3 MHz. Los dos resultados principales pueden resumirse del modo siguiente: en primer lugar, la calidad de la imagen disminuye gradualmente a medida que disminuye la frecuencia de muestreo de las señales de diferencia de color de un valor igual al utilizado para la señal de luminancia a un cuarto de ese valor y, en segundo lugar, la calidad de la imagen obtenida utilizando el proceso de incrustación disminuye considerablemente a medida que se reduce la frecuencia de muestreo utilizada para las señales de diferencia de color; esta disminución es mayor cuando la frecuencia de muestreo se reduce de la mitad de la utilizada para la señal de luminancia a un cuarto de ese valor.

Los documentos [CCIR, 1982-86d] y [Khleborodov, 1983] contienen un estudio teórico de las distorsiones de imagen en la transmisión secuencial en línea de señales de diferencia de color con un ciclo de dos tramas.

El documento [CCIR, 1982-86k] expone los resultados de evaluaciones subjetivas de la calidad de imagen obtenidos con codificación 4 : 1 : 1, 4 : 2 : 0, 2 : 1 : 1 y 3 : 1 : 0, incluidos los efectos del submuestreo por desplazamiento de línea y de trama, y del procesamiento secuencial en línea de las señales de diferencia de color. En estas pruebas se utilizaron imágenes de prueba estacionarias. Los resultados revelaron que la calidad de imagen para 2 : 1 : 1 con submuestreo por desplazamiento de trama era superior a la de los otros niveles de relación con similar velocidad binaria para la mayor parte de las imágenes sometidas a prueba.

En [CCIR, 1982-86l] se informa sobre ciertas pruebas subjetivas en torno a un sistema de relación 2 : 1 : 1 que emplea submuestreo de trama con desviación; los resultados de estas pruebas indican que se ha conseguido una representación satisfactoria del movimiento.

3.2 *Cambio de la velocidad de muestreo*

El cambio de la velocidad de muestreo es un procedimiento necesario en muchas operaciones de tratamiento de la imagen. Un ejemplo es el cambio que se efectúa en la conversión de señales de un nivel de la familia de normas compatibles de codificación a otro. En [CCIR, 1978-82u] se describe un proceso de filtrado, basado en un filtrado en peine de la parte superior del espectro de la señal, que permite convertir fácilmente las señales entre diversos niveles de una familia con una jerarquía de relación binaria (4 : 4 : 4, 4 : 2 : 2, 2 : 1 : 1). En [CCIR, 1978-82t; Nishizawa y otros, 1981] se describe un filtro paso bajo de interpolación muy complejo para la misma finalidad.

El cambio de la velocidad de muestreo es también necesario cuando la familia de normas compatibles de codificación digital no se basa en relaciones binarias. En [CCIR, 1978-82v] se indica que el diseño del filtro de interpolación no necesita ser demasiado complicado, siempre que el cambio de la velocidad de muestreo entrañe una relación descrita por un número racional.

En [CCIR, 1982-86m] se muestra la forma en que pueden utilizarse diversos procedimientos de codificación en origen y técnicas de reducción de velocidad binaria para adaptar los diversos niveles de la familia de normas de codificación digital compatibles a niveles adecuados de la jerarquía de transmisión basada en 2048 kbit/s.

A fin de evitar pérdidas de calidad debidas a conversiones de la frecuencia de muestreo y a procedimientos de codificación en tándem, y de eliminar la necesidad de instalar equipo de transcodificación en todos los nodos de la red de transmisión explotados a diferentes velocidades binarias, conviene efectuar la conversión de velocidad binaria en el estudio de televisión con arreglo a la velocidad binaria de la sección de circuito que tenga menor anchura de banda.

Por tanto, las señales transmitidas por un enlace punto a punto compuesto por una conexión en tándem de secciones de diferente capacidad deben codificarse con arreglo a la sección de menor capacidad, a menos que haya de disponerse de una señal de mayor calidad en un punto intermedio.

4. Modulación por impulsos codificados (MIC) con cuantificación uniforme

La forma básica de la codificación digital es la MIC cuantificada de manera uniforme, donde el valor de cada «palabra» digital representa la amplitud cuantificada uniformemente de una muestra de la señal de banda de base.

En todos los ejemplos indicados anteriormente, se propone una cuantificación uniforme de 8 bits por muestra para la señal de luminancia y para las señales de diferencia de color [CCIR, 1978-82e, k, l y w].

5. Métodos de multiplexaje

Para la transmisión por un solo canal de señales componentes codificadas digitalmente es preciso combinar en forma multiplexada en el tiempo las tres señales codificadas por separado, que describen la luminancia y las dos señales de diferencia de color, respectivamente.

En [CCIR, 1978-82x] se comparan dos formas de multiplexaje. En la primera se agrupan las tres palabras digitales que describen cada elemento de imagen; en la segunda se agrupan las palabras que describen los valores de la señal de luminancia de todos los elementos de imagen contenidos en una línea, y este grupo de palabras va seguido de dos grupos, cada uno de los cuales describe los correspondientes valores de las señales de diferencia de color. En la comparación se llega a la conclusión de que el primer procedimiento es más económico, pero que el segundo es más ventajoso con respecto a la verificación.

En [CCIR, 1978-82k] se considera una estructura de multiplexaje idéntica a la primera de las descritas anteriormente.

Los trabajos sobre la codificación digital de señales componentes realizados en la URSS, y descritos en [CCIR, 1978-82e], comprenden una disposición de multiplexaje en que las señales se transmiten en el orden siguiente: Y, D_R, Y, Y, D_B, Y , donde Y representa un valor de la señal de luminancia, y D_R y D_B representan valores de las señales de diferencia de color.

En [CCIR, 1982-86n] se describe un multiplexor que combina dos señales, cada una con una velocidad binaria de unos 70 Mbit/s, para producir una señal de cuarto orden de nivel jerárquico, es decir, de 139 264 kbit/s. Cada contribuyente de 70 Mbit/s puede contener una señal de televisión digital o dos señales de 34 368 kbit/s. La señal de alineación de trama y la velocidad binaria neta de los dos contribuyentes se ajustan a los requisitos de telefonía y de televisión. De este modo puede conseguirse adaptación de las señales de televisión a otras velocidades binarias jerárquicas. La inserción de una señal de alineación de trama en el interfaz entre el estudio de televisión y el sistema de transmisión facilitaría considerablemente la transmisión de señales de televisión en la «Red Digital de Servicios Integrados» (RDSI).

El documento [CCIR, 1982-86o] describe los resultados de los estudios sobre un método de transmisión de bits en paralelo que permite una fácil transcodificación hacia y desde un formato de bits en serie que tenga una velocidad binaria de 108 Mbit/s utilizando dos canales, y también hacia y desde un formato de canal único a 216 Mbit/s. El documento [CCIR, 1982-86p] da algunos detalles del interfaz paralelo/serie a 2×108 Mbit/s y del interfaz serie a 216 Mbit/s.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKRICH, C. y ZACCARIAN, P. [junio de 1981] Production requirements for digital television systems. *EBU Rev. Tech.*, 187.
- DEVEREUX, V. G. [1982] Tests on eight video PCM codecs in tandem handling composite PAL and monochrome video signals. BBC Research Department Report RD 1982/19.
- DEVEREUX, V. G. [junio de 1984] Filtering of the colour-difference signals in 4:2:2 YUV video coding systems. BBC Research Department Report 1984/4.
- KHLEBORODOV, V. A. [1983] Postrochnaya peredacha tsvetoraznostnykh signalov v tsifrovom televidenii (Transmisión secuencial en línea de señales de diferencia de color en televisión digital). *Tekhnika kino i Televideniya*, 7, 44.

- KRETZ, F. y SABATIER, J. [marzo-abril de 1981] Echantillonnage des images de télévision: analyse dans le domaine spatiotemporal et dans le domaine de Fourier. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 36, 3-4, 231-273.
- NISHIZAWA, T., YUYAMA, I., OKADA, K., TANAKA, Y., KUBOTA, K. e ISHIDA, J. [septiembre de 1981] Experimental component coding system. NHK Lab. Note 264.
- SABATIER, J. y CHATEL, J. [noviembre-diciembre de 1981] Qualité des signaux de télévision en bande de base - II^e Partie - Evaluation des performances de diverses méthodes de décodage des signaux de TV-couleur. *Radiodif.-Télév.*, Vol. 5/5, 70, 12-21.
- SABATIER, J. y SALLIO, P. [septiembre-octubre de 1981] Qualité des signaux de télévision en bande base - I^{re} Partie - Evaluation subjective de l'effet de la limitation de largeur de bande sur les composantes du signal de télévision. *Radiodif.-Télév.*, Vol. 4/5, 69, 7-15.
- SMPTE JOURNAL [octubre de 1981] Special Issue: A report of digital video demonstrations using component coding.
- UER [junio de 1981] Numéro sur le codage numérique de la télévision *UER Rev. Téch.*, 187.
- WENGENROTH, G. [1982] Die Codierung von Farbfernseh- und Bildfernsprechsignalen in einem digitalen optischen Teilnehmeranschlusnets (Codificación de señales de televisión en color y videotelefónicas en una red de distribución digital por cable de fibra óptica). *NTZ-Archiv.*, Vol. 4, 4.

Documentos del CCIR.

- [1978-82]: a. 11/17 (UER); b. 11/18 (UER); c. 11/289 (Reino Unido); d. 11/89 (Polonia (República Popular de)); e. 11/128 (URSS); f. 11/305 (Japón); g. 11/113 (Alemania (República Federal de)); h. 11/261 (Francia); i. 11/323 (Italia); j. 11/327 (Italia); k. 11/14 (UER); l. 11/112 (Alemania (República Federal de)); m. 11/330 (UER); n. 11/285 (Reino Unido); o. 11/288 (Reino Unido); p. 11/328 (URSS); q. 11/302 (Polonia (República Popular de)); r. 11/278 (Alemania (República Federal de)); s. 11/292 (Estados Unidos de América); t. 11/343 (Japón); u. 11/294 (Estados Unidos de América); v. 11/243 (Alemania (República Federal de)); w. 11/31 (Estados Unidos de América); x. 11/111 (Alemania (República Federal de)).
- [1982-86]: a. 11/393 (Polonia (República Popular de)); b. 11/327 (URSS); c. 11/348 (Italia); d. 11/292 (GIT 11/7); e. 11/65 (Reino Unido); f. 11/276 (Reino Unido); g. 11/424 (OIRT); h. 11/31 (Japón); i. 11/13 (Alemania (República Federal de)); j. 11/90 (URSS); k. 11/22 (Japón); l. 11/415 (Japón); m. 11/14 (Alemania (República Federal de)); n. 11/15 (Alemania (República Federal de)); o. 11/24 (Japón); p. 11/136 (OIRT).

[1986-90]: a. GIT 11/7-138 (Reino Unido); b. GIT 11/7-159 (Italia).

BIBLIOGRAFÍA

- KHLEBORODOV, V. A. y SHTEINBERG, A. L. [1984] Vybór pred i postfiltróv dlya tsifrovogo TV standarta 4 : 2 : 2 (Elección de prefiltros y postfiltros para TV digital para el nivel de la familia de relación 4 : 2 : 2). *Tekhnika kino i Televideniya*, 2, 50-53.
- KHLEBORODOV, V. A. y SOROKA, E. Z. [1980] Diskretizatsiya polnykh tsvetovykh videosignalov (Muestreo de señales de video en color). *Tekhnika sredstv svyazi* en la serie *Tekhnika Televideniya*, 3, 23.
- KRIVOSHEEV, M. I., NIKANOROV, S. I. y KHLEBORODOV, V. A. [1983] Mezhdynarodny standart tsifrovogo kodirovaniya TV signalov - Chast 1 (Norma internacional para la codificación digital de señales de televisión - Parte I) *Radio i televidenie* (OIRT), 1.
- OIRT [septiembre de 1983] Opredelenie kharakteristik i dopuskov vkhodnykh filtrov signala yarkosti i signalov tsvetnosti, pri tsifrovom kodirovanii televizionnykh signalov (Determinación de las características y tolerancias de los filtros de entrada para señales de luminancia y crominancia en la codificación digital de señales de televisión). Doc. TK-III-1638, República Popular de Polonia.