

SECCIÓN 11F: MÉTODOS DIGITALES PARA TRANSMITIR LA INFORMACIÓN DE TELEVISIÓN

INFORME 629-4

CODIFICACIÓN DIGITAL DE SEÑALES DE TELEVISIÓN EN COLOR

(Cuestión 25/11, Programas de Estudios 18L/11, 25G/11, 25L/11 y 25M/11)

(1974-1978-1982-1986-1990)

1. Introducción

La Comisión de Estudio 11 ha reunido, previamente y durante el periodo de estudios 1982-1986, una gran cantidad de información relativa a la codificación, procesamiento, transmisión y grabación en los estudios de señales de video mediante componentes digitales. Este trabajo se recoge en la Recomendación 601 relativa a la codificación de las señales digitales de video en los estudios de producción, así como en la Recomendación 656 relativa a los interfaces en los estudios para señales digitales de video.

Este trabajo se ha tenido también en cuenta en la Recomendación 656 sobre el formato para la grabación digital (Recomendación 657) y en los estudios de la Comisión de Estudio 11 sobre la reducción de la velocidad binaria (Informe 1089) así como en los estudios de la CMTT concernientes a la transmisión de las señales de imagen.

Este Informe resume el trabajo sobre métodos de codificación para las señales video producidas en los estudios, procedentes tanto de fuentes digitales como analógicas, y proporciona las bases para la Recomendación 601 relativa a los parámetros de codificación de las señales digitales de televisión en los estudios. Esto se complementa con el Informe 962 relativo al filtrado, muestreo y multiplexaje de las señales digitales.

2. Principios básicos**2.1 Parámetros de codificación digital en el estudio para televisión convencional**

Se han propuesto dos métodos diferentes para solucionar el problema de la codificación:

- *Codificación de componentes:* En este método, las componentes de las señales de luminancia y de diferencia de color se codifican por separado y se transmiten juntas como trenes de bits independientes multiplexados en el tiempo. Cuando la señal de televisión en color se encuentre en la forma compuesta NTSC, PAL o SECAM, será necesario separar primero la señal en sus componentes de luminancia y de diferencia de color.
- *Codificación compuesta:* En este método, la señal compleja de color se codifica en su forma compuesta como un solo tren de bits.

El primer método ofrece ventajas con respecto al segundo porque, en el futuro, será posible transmitir la señal en forma digital desde su origen al transmisor de radiodifusión. Sólo en este último será necesario generar la señal compuesta. Al menos en el terreno de la transmisión, desaparecerían las diferencias entre los sistemas NTSC, PAL y SECAM, lo que simplificaría los problemas relacionados con el intercambio internacional de programas [CCIR, 1974-78a], excepto en los casos en que intervienen diferentes normas de barrido. (El intercambio internacional de programas se relaciona con la provisión del interfaz requerido para los equipos magnetoscópicos y con el interfaz con los equipos de transmisión.) El segundo método se considera ventajoso cuando la cadena completa está constituida por varias secciones digitales y analógicas en tándem, como es probable que ocurra durante el periodo en que se introduzcan las técnicas digitales en radiodifusión.

La mayoría de las administraciones están ahora de acuerdo en que sería sumamente interesante utilizar la codificación de componentes para las normas del estudio. Para ello se argumentan las siguientes razones:

- Los recientes desarrollos tecnológicos, sobre todo en materia de almacenamiento mediante memorias de semiconductores y de grabación en cinta magnética, han abierto nuevas y prometedoras perspectivas con respecto al proceso electrónico de la imagen y a los efectos especiales. En el pasado, sólo se podía disponer de esas facilidades utilizando técnicas cinematográficas onerosas [CCIR, 1978-82a].
- La codificación de componentes permite una norma mundial uniforme, salvo para la frecuencia de trama. Dicha norma tiene el mayor número de valores de parámetros significativos comunes a los sistemas de 525 y de 625 líneas. Puede permitir que el equipo y el funcionamiento tengan el máximo número de características comunes, lo que no es posible con normas analógicas o digitales compuestas. Salvo para la frecuencia de trama (que podría ser conmutable), los estudios en todo el mundo utilizarían muchos elementos de equipos comunes, y se simplificaría mucho la producción y el intercambio de programas.

Al definir el método de reducción de la velocidad binaria que pudiera utilizarse en los estudios de televisión, antes de la interconexión a cualesquiera facilidades de transmisión a larga distancia, importa tener en cuenta las jerarquías digitales en proceso de normalización por el CCITT [CCIR, 1974-78b].

En [CCIR, 1978-82b] la UER ha propuesto que, para facilitar el intercambio internacional de programas, se utilice una señal basada en la codificación separada de las señales componentes de luminancia y de diferencia de color. Estudios efectuados por la UER han demostrado claramente el interés que presenta la codificación digital para evitar algunas de las limitaciones asociadas a los sistemas PAL y SECAM, y se indica la posibilidad de establecer una norma digital universalmente compatible [CCIR, 1978-82c]. Estas consideraciones, combinadas con propuestas similares de otras administraciones, han dado como resultado la Recomendación 601, según la cual debe preferirse el uso de la codificación de componentes para todos los estudios a los fines del intercambio internacional.

2.2 Parámetros de codificación digital en estudio para TVAD

El Grupo Interino de Trabajo 11/7 ha examinado este tema, según lo dispuesto en la Decisión 60, y los resultados obtenidos hasta mayo de 1989 se presentaron como Contribución a la Reunión Extraordinaria de la Comisión de Estudio 11 sobre TVAD [CCIR, 1986-90a].

En la Contribución se examinan varios métodos para establecer una norma digital de estudio de TVAD basados en los conceptos de un formato común de imagen o de una velocidad común de datos.

El Grupo Interino de Trabajo 11/7 aún sigue examinando este tema y espera recibir Contribuciones, en particular, sobre los siguientes aspectos:

- características de la señal digital;
 - a) niveles de la señal digital;
 - b) forma de codificación;
 - c) margen dinámico;
- requisitos de interfaz digital;
 - a) interfaces paralelo y serie;
 - b) palabras de sincronización, número de bits, etc.;
- señales digitales de sincronización;
- señales digitales de prueba;
- requisitos para el tratamiento de la imagen digital;
 - a) requisitos para la supresión de trama horizontal y vertical;
 - b) modificación del tamaño de imagen que puede conseguirse mediante los procesos de edición, etc.

3. Métodos de codificación

En todos los métodos de codificación digital que se estudian actualmente, los procesos iniciales son el muestreo y la cuantificación.

3.1 Anchura de banda y muestreo

El proceso de muestreo se rige por tres factores básicos:

- la estructura del muestreo, es decir, la posición relativa de las muestras en el espacio y el tiempo;
- el número de muestras por línea;
- el proceso de filtrado, que puede ser de una, dos o tres dimensiones.

La estructura de muestreo mencionada más arriba puede, o no, ser iterativa en lo que respecta a la imagen. De modo semejante, el número de muestras por línea indicado puede, o no, ser constante de una línea a otra.

Según la teoría clásica, la frecuencia de muestreo tiene que ser igual o superior al doble de la frecuencia más alta de la señal, es decir, tiene que corresponder al muestreo de Nyquist. Sin embargo, ciertos estudios han demostrado que pueden utilizarse en la práctica frecuencias de muestreo más bajas (es decir, un muestreo por debajo del límite de Nyquist) [Messerschmid, 1969].

3.1.1 Señales componentes

La UER ha sugerido en [CCIR, 1974-78c] que los países que codifican digitalmente las componentes separadas utilicen una estructura de muestreo iterativa que se repita de imagen a imagen. En [CCIR, 1974-78d] se apoya este método. Las estructuras de muestreo iterativas pueden ser ortogonales [CCIR, 1974-78e] o intercaladas.

En el Informe 962 se describe con algún detalle el trabajo conducente a la elección de los parámetros de muestreo enumerados en la Recomendación 601 como la base de un código para estudios de televisión, por lo que en este Informe sólo se expone un breve resumen.

Las administraciones han estudiado diversas frecuencias de muestreo para la señal de luminancia del nivel 4 : 2 : 2, en particular 12 MHz, 12,5 MHz, 13 MHz, 13,5 MHz y 14,3 MHz. Entre los factores estudiados, que tendrán una posible influencia en la elección de la frecuencia de muestreo, figuran la calidad de la imagen básica, la calidad de la imagen una vez procesada, las relaciones costo/rendimiento, la capacidad potencial de los magnetoscopios digitales, la reducción de la velocidad binaria a niveles de la jerarquía de transmisión y la compatibilidad con las señales compuestas y la codificación compuesta.

Durante sus estudios, algunas administraciones observaron ventajas en la elección de una frecuencia de muestreo en relación con la frecuencia de la subportadora de color de la señal compuesta, porque esto puede ser favorable en la utilización mixta de la codificación de señales componentes y compuestas a escala nacional. Sin embargo, consideraron que los beneficios de la unificación mundial de la frecuencia de muestreo puede alterar el equilibrio de las ventajas a favor del valor convenido.

Se adoptó para una norma mundial la frecuencia de muestreo de la señal de luminancia de 13,5 MHz. Se trata de un compromiso entre la necesidad de elegir valores que permitan un equipo prácticamente realizable y económico, por un lado, y la de disponer del suficiente grado de tratamiento de la imagen, por otro. Asimismo esta frecuencia es la única en la gama de 12 a 14,3 MHz que permite un número entero de muestras por línea tanto para los sistemas de 525 líneas como para los de 625 líneas [CCIR, 1978-82d, e, f, g, h, i y j]. La frecuencia de muestreo para las señales de diferencia de color se fijó en la mitad de la que se utiliza para la señal de luminancia, después de comprobar que esto permitiría una calidad adecuada en el proceso de incrustación automática. El interfaz digital para los equipos de estudio de televisión se examina en el Informe 1088 titulado «Interfaces para señales video digitales en sistemas de televisión de 525 líneas y 625 líneas».

Se previó que no era probable abarcar mediante un solo conjunto de parámetros digitales las aplicaciones actuales y previstas de la televisión. Por tanto, se propuso una *familia ampliable de normas de codificación digital* compatibles [CCIR, 1978-82k, l, m].

Los niveles de la familia se designan por una secuencia de números enteros, tal como 4 : 2 : 2 ó 4 : 4 : 4. Estos números representan la relación entre la frecuencia de muestreo de la señal de luminancia (primer número) y la frecuencia de muestreo de las señales de diferencia de color (números subsiguientes). La convención adoptada es que el número 4 representa la frecuencia principal de muestreo de 13,5 MHz (nominal). Así pues, por ejemplo, el nivel de la familia 4 : 2 : 2 se caracteriza por frecuencias de muestreo de 13,5 y 6,75 MHz para las señales de luminancia y de diferencia de color, respectivamente, como se definen en la Recomendación 601.

En [CCIR, 1978-82m] se considera que un posible conjunto de esas normas corresponde a los siguientes niveles:

- una norma para los estudios de producción de programas;
- una norma inferior que utilice los mismos parámetros de exploración, pero que dé como resultado velocidades binarias y costos inferiores, apropiados para aplicaciones de menor calidad;
- una norma de más alta calidad, con una capacidad superior a las proporcionadas por las normas de exploración actuales.

En [CCIR, 1978-82n] se sugiere que un código digital compatible internacionalmente podría consistir en un código de componentes que incorporara un muestreo sincronizado con la frecuencia de línea (ortogonal), un número idéntico de muestras por línea, tanto para los sistemas de 525 como de 625 líneas, y que pertenezcan a una familia ampliable de normas de codificación compatibles que tengan frecuencias de muestreo relacionadas sencillamente entre sí. Deben efectuarse nuevos estudios sobre la definición de las frecuencias de muestreo preferidas.

En 1980 y 1981 la UER [CCIR, 1978-82d y f], la SMPTE [CCIR, 1978-82g] y la NHK de Japón [CCIR, 1978-82o; Nishizawa y otros, 1981] hicieron evaluaciones subjetivas de una familia ampliable de sistemas digitales de televisión con codificación por componentes. Las pruebas incluyeron los niveles de familias 4:4:4, 4:2:2 y 4:1:1 de codificación binaria con frecuencias de muestreo de la luminancia situadas entre 12 y 14,3 MHz. Los resultados de todas esas pruebas fueron concordantes y tienden a confirmar que el nivel 4:2:2 es la selección preferida para el interfaz normalizado para los estudios y que la elección de una frecuencia de muestreo de 13,5 MHz constituye una transacción satisfactoria entre la calidad aceptable de la imagen después de su tratamiento y las velocidades binarias requeridas. Esta opinión se comparte también en [CCIR, 1978-82e].

En [CCIR, 1986-90b] se presenta la posibilidad de utilizar el nivel 4:2:2 de la Recomendación 601 con imágenes que tienen un formato de imagen más ancho (16:9 en vez de 4:3), y se señala que los equipos de estudio sólo necesitan ligeras modificaciones y que puede utilizarse el mismo interfaz de la Recomendación 656. Sin embargo, en estas aplicaciones debe observarse que las señales de formato más ancho no deben entremezclarse con señales de formato convencional (4:3).

En [CCIR, 1978-82k] se describe una familia ampliable de códigos, basada en un código de componentes con una relación de las velocidades de muestreo de 4:1:1 (entre la luminancia y las señales de diferencia de color). Esos códigos podrían transcodificarse fácilmente a un código NTSC de interfaz digital compuesto, y la familia puede extenderse rápidamente hacia arriba para una televisión de mayor definición, cuando los avances de la técnica lo justifiquen. Asimismo, la familia de códigos puede extenderse hacia abajo para códigos de interfaz de definición inferior, en el caso de aplicaciones especiales; por ejemplo, la captación electrónica de noticias (o periodismo electrónico).

El nivel 4:4:4 descrito en el anexo a la Recomendación 601 está siendo objeto de estudio por parte tanto de la UER como de la SMPTE. El interfaz 4:4:4 está destinado a gráficos complejos y a la post-producción. No se pretende sustituir los interfaces 4:2:2 ya especificados en la Recomendación 656, puesto que se consideran más adecuados para las operaciones normales de estudio. Se piensa que el interfaz 4:4:4 especificará codificación MIC con más de 8 bits por muestra. En la UER y en la SMPTE se ha convenido la inclusión de la señal de incrustación como parte del conjunto básico de señales. A este nivel de la Recomendación 601 se le designa ahora como 4:4:4:4 ó 4 x 4. El trabajo se concentra en adecuar la información del interfaz actual descrito en la Recomendación 656. Entre los temas cuya investigación se continúa todavía, están los efectos de varios algoritmos de redondeo dinámico para minimizar el número de bits por muestra, y también las características de filtrado y los requisitos de las señales de incrustación. El redondeo dinámico es un proceso por el que se oculta los errores que surgen cuando se reduce la longitud de palabra de una muestra, por ejemplo de 10 bits a 8 bits.

En [CCIR, 1978-82p] se sugieren criterios de diseño y una posible aplicación para un nivel más bajo dentro de una familia ampliable de códigos digitales compatibles. Se indican los parámetros del sistema y los resultados de pruebas correspondientes a un códec experimental que funciona a la mitad de la velocidad binaria de la norma principal para estudios. Este sistema se caracteriza por una relación no binaria entre las frecuencias de muestreo de la luminancia de niveles correspondientes y una relación de 3:1 entre las frecuencias de muestreo de la señal de luminancia y las señales de diferencia de color codificadas en secuencias de líneas. En [CCIR, 1982-86a] se describe una evaluación subjetiva, utilizando imágenes de prueba estáticas de varias normas posibles de nivel más bajo, que incluye los efectos del submuestreo con desplazamiento de líneas y desplazamiento de tramas y del procesamiento secuencial en línea de las señales de diferencia de color. En [CCIR, 1982-86b] figura un estudio teórico de la distorsión de la imagen que se produce cuando se utiliza la transmisión secuencial en línea de las señales de diferencia de color con un ciclo de dos tramas.

En [CCIR, 1986-90c] se sugiere la utilización de valores de los parámetros para una codificación económica de la señal al nivel más bajo y velocidades de muestreo, con relaciones $2\frac{2}{3}$; $1\frac{1}{3}$; $1\frac{1}{3}$. La utilización de estos parámetros en vez de 2:1:1, permite utilizar una respuesta de corte progresivo lento, simplificando así los filtros.

Parece haber poco interés en los niveles inferiores de las normas de codificación digital de la Recomendación 601. El esfuerzo actual parece estar dirigido al logro de objetivos fijados originalmente para los niveles inferiores de la familia, tales como periodismo electrónico y operaciones de campo, con el nivel 4:2:2, utilizando técnicas de reducción de la velocidad binaria.

En [Rossi, 1981] se describe un grupo de filtros digitales adaptados a una familia binaria, que realizan una conversión descendente de velocidad de muestreo de 2 a 1 y una conversión ascendente de velocidad de muestreo de 1 a 2, mediante una interpolación por filtro en peine.

Es conveniente para los equipos que los niveles de una familia tengan números compatibles de muestras por línea. Los miembros de la familia digital deben elegirse teniendo en cuenta otras posibles representaciones de señales de televisión con el fin de limitar el número y la complejidad de las operaciones de transcodificación en el recorrido de la señal. En [CCIR, 1982-86c] se enumeran algunas de las representaciones que se han propuesto.

Las duraciones nominales de las líneas activas para los sistemas de 525/60 y 625/50 son ligeramente diferentes. Para armonizar los dos sistemas en el dominio de componentes digitales, se define una «línea activa digital» (LAD), que tiene suficientes muestras digitales para abarcar las líneas activas de los sistemas 525/60 ó 625/50. Hay ventajas evidentes en que ambos sistemas necesiten precisamente el mismo volumen de memoria de líneas digitales y la LAD pueda procesarse exactamente de la misma manera para los dos sistemas de 525 ó 625 líneas. El número de muestras asociado con la supresión de trama analógica es diferente, pero no es necesario introducir esto en el dominio de las componentes digitales. La supresión de trama adecuada a la norma de radiodifusión nacional debe aplicarse en el punto en que la señal se convierte en analógica.

La línea activa para los sistemas de 525 es la más larga de las dos, y con las tolerancias que se utilizan actualmente en la práctica, se necesitan más de 710 muestras para cubrir una línea. Las 720 muestras por línea activa digital indicada en la Recomendación 601 se han elegido porque cumple convenientemente esta necesidad.

Definición de la señal de luminancia (E'_Y) y de las señales de diferencia de color ($E'_R - E'_Y$) y ($E'_B - E'_Y$)

Una propuesta de construcción de las señales de luminancia y de diferencia de color forma parte de la Recomendación 601 y se indica como sigue:

$$E'_Y = 0,299 E'_R + 0,587 E'_G + 0,114 E'_B \quad (\text{véase la nota})$$

donde

$$\begin{aligned} (E'_R - E'_Y) &= E'_R - 0,299 E'_R - 0,587 E'_G - 0,114 E'_B \\ &= 0,701 E'_R - 0,587 E'_G - 0,114 E'_B \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned} (E'_B - E'_Y) &= E'_B - 0,299 E'_R - 0,587 E'_G - 0,114 E'_B \\ &= -0,299 E'_R - 0,587 E'_G + 0,886 E'_B \end{aligned}$$

Nota. — Véase el Informe 624, cuadro II.

Tomando los valores de señal como normalizados a la unidad (ejemplo, niveles máximos de 1,0 V), los valores obtenidos para los colores blanco, negro, saturado primario y complementario son los siguientes:

CUADRO I

| Condición | E'_R | E'_G | E'_B | E'_Y | $E'_R - E'_Y$ | $E'_B - E'_Y$ |
|-----------|--------|--------|--------|--------|---------------|---------------|
| Blanco | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0 | 0 |
| Negro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rojo | 1,0 | 0 | 0 | 0,299 | -0,701 | -0,299 |
| Verde | 0 | 1,0 | 0 | 0,587 | -0,587 | -0,587 |
| Azul | 0 | 0 | 1,0 | 0,114 | -0,114 | 0,886 |
| Amarillo | 1,0 | 1,0 | 0 | 0,886 | 0,114 | -0,886 |
| Cian | 0 | 1,0 | 1,0 | 0,701 | -0,701 | 0,299 |
| Magenta | 1,0 | 0 | 1,0 | 0,413 | 0,587 | 0,587 |

Aunque los valores de E'_Y están ya comprendidos en la gama de 1 a 0, los de ($E'_R - E'_Y$) se sitúan en la gama de +0,701 a -0,701, y los de ($E'_B - E'_Y$) en la gama de +0,886 a -0,886. Para renormalizar respecto a la unidad la gama de las señales de diferencia de color (es decir, de +0,5 a -0,5), se pueden calcular los coeficientes siguientes:

$$K_R = \frac{0,5}{0,701} = 0,713; \quad K_B = \frac{0,5}{0,886} = 0,564;$$

Entonces

$$E'_{C_R} = 0,713 (E'_R - E'_Y) = 0,500 E'_R - 0,419 E'_G - 0,081 E'_B$$

y

$$E'_{C_B} = 0,564 (E'_B - E'_Y) = -0,169 E'_R - 0,331 E'_G + 0,500 E'_B$$

donde E'_{C_R} y E'_{C_B} son las señales renormalizadas de diferencia de color para rojo y azul, respectivamente.

En el caso de una codificación binaria de 8 bits con cuantificación uniforme, se especifican 2^8 (es decir, 256) niveles de cuantificación, con igual separación, con lo que la gama de números binarios disponible va de 0000 0000 a 1111 1111 (00 a FF en la notación hexadecimal), siendo los números decimales equivalentes 0 a 255, inclusive.

En el caso de sistema de relación 4 : 2 : 2 descrito en la Recomendación 601, los niveles 0 y 255 se reservan para datos de sincronización, mientras que los niveles 1 a 254 están disponibles para video.

Dado que la señal de luminancia sólo va a ocupar 220 niveles, para proporcionar márgenes de trabajo y que el negro se encuentre en el nivel 16, el valor decimal de la señal de luminancia, \bar{Y} , antes de la cuantificación es:

$$\bar{Y} = 219 (E'_Y) + 16,$$

y el número de nivel correspondiente, después de la cuantificación, es el número entero más próximo.

Análogamente, como las señales de diferencia de color van a ocupar 225 niveles y como el nivel 0 va a ser el nivel 128, los valores decimales de las señales de diferencia de color, \bar{C}_R y \bar{C}_B , antes de la cuantificación son:

$$\bar{C}_R = 224 [0,713 (E'_R - E'_Y)] + 128$$

y

$$\bar{C}_B = 224 [0,564 (E'_B - E'_Y)] + 128$$

que simplificando se convierten en:

$$\bar{C}_R = 160 (E'_R - E'_Y) + 128$$

y

$$\bar{C}_B = 126 (E'_B - E'_Y) + 128$$

y el número de nivel correspondiente, después de la cuantificación, es el número entero más próximo.

Los equivalentes digitales se denominan Y , C_R y C_B .

En [CCIR, 1982-86d] se ha señalado que puede ser necesario un ulterior examen de la relación entre niveles de video analógicos y niveles de cuantificación, de acuerdo con los actuales requisitos de márgenes de explotación.

Nota. — En el § 2.4 del anexo II a la Recomendación 601 se considera la cuantificación y codificación para la construcción de Y , C_R , C_B a partir de señales diferentes de las señales de luminancia y de diferencia de color.

La codificación digital en la forma de señales Y , C_R y C_B puede representar una gama de valores de señales notablemente mayor que la que pueden sustentar las gamas correspondientes de señales R , G y B . Es posible, por ello, como consecuencia de la generación electrónica de imágenes o el tratamiento de señales, producir señales Y , C_R y C_B que, aun siendo válidas individualmente, den lugar a valores fuera de gama al convertirlas en señales R , G y B . Según [Devereux, 1987] es más conveniente y eficaz evitar esto imponiendo limitaciones a las señales Y , C_R y C_B que esperar a que las señales estén en la forma R , G y B . Además, se han descrito técnicas mediante las cuales es posible aplicar limitaciones de manera que se mantengan los valores de luminancia y tonalidad, minimizando la degradación subjetiva a costa únicamente de la saturación.



3.1.2 Señales complejas

Puede aplicarse el muestreo por debajo del límite de Nyquist muestreando la señal compleja PAL a razón de dos veces la frecuencia de la subportadora [Devereux y Phillips, 1974]. El códec digital para este muestreo utiliza un filtrado que introduce pequeñas pérdidas en la resolución de luminancia diagonal y en la resolución de crominancia vertical. Sin embargo, un filtrado adicional de este tipo en todo proceso subsiguiente de muestreo sub-Nyquist, no debiera introducir ninguna degradación de la resolución [Stott y Phillips, 1977].

En el sistema M/NTSC, se tiene tendencia a utilizar una frecuencia de muestreo tres o cuatro veces superior a la frecuencia de la subportadora de color. Sin embargo, en [CCIR, 1974-78f], se da cuenta de estudios efectuados sobre un sistema de codificación que utiliza una frecuencia de muestreo múltiplo entero de la frecuencia de línea. La técnica de muestreo sub-Nyquist ha sido también utilizada con señales NTSC [Rossi, 1976].

En [Patel, 1980] se describen los efectos del filtrado de paso bajo en la señal compleja analógica del sistema I/PAL. Se llega a la conclusión de que predomina la sobreoscilación de crominancia, pudiéndose mitigar la degradación resultante con una mejor corrección del retardo.

3.1.3 Compatibilidad entre la señal compuesta y las señales componentes separadas

En [CCIR, 1974-78c] la UER señala la necesidad de que los métodos propuestos de codificación de la señal compuesta de 625 líneas y los de codificación de las componentes separadas sean compatibles.

Experimentos de la UER [CCIR, 1978-82b] han demostrado que utilizando un códec perfeccionado y efectuando el muestreo a la frecuencia de línea, puede lograrse una buena calidad de codificación y decodificación de señales PAL analógicas a YUV digitales.

En [Clarke, 1986], se ofrecen detalles de las técnicas digitales utilizadas para generar señales subportadoras en cuadratura, a partir de una frecuencia de muestreo sincronizada con la línea, que se utilizan en los codificadores de color compuesto y para sincronizar estas señales con la ráfaga de referencia de entrada en los decodificadores de color. Estas técnicas permiten obtener en los codificadores y decodificadores una calidad más estable y características más definidas producidas por la realización digital, sin necesidad de efectuar una conversión de la frecuencia de muestreo. La descripción incluye también las modificaciones necesarias para poder funcionar con señales NTSC.

Además, en [Clarke, 1988], se describen varios métodos de filtrado para conseguir una separación de alta calidad de los componentes de luminancia y crominancia de una señal PAL, a fin de obtener principalmente señales digitales Y, C_R y C_B a partir de PAL en un contexto de estudio digital. Los métodos comprenden desde filtros de peine de retardo de línea relativamente sencillos a filtros de peine tridimensionales que emplean retardos múltiples de imagen, trama y línea. Los resultados de pruebas subjetivas en las que se comparan los diferentes métodos indican que, si bien un ligero grado de filtrado temporal puede mejorar notablemente la calidad de funcionamiento, un mayor uso de esta técnica puede causar la degradación de objetos en movimiento.

3.1.4 Modificación de la frecuencia de muestreo

En un determinado sistema que utilice la codificación de la señal compleja o la codificación de componentes, puede ser necesario modificar la frecuencia de muestreo.

En [CCIR, 1974-78g] se describe un método que puede utilizarse con el sistema M/NTSC para modificar la frecuencia de muestreo de 4 a 3 veces la frecuencia de la subportadora NTSC, e inversamente.

En [CCIR, 1974-78h], que propone el posible empleo de dos frecuencias de muestreo en el estudio PAL digital, se indica que una señal muestreada a $4f_{sc}$ puede convertirse muy fácilmente en una señal muestreada a $2f_{sc}$, e inversamente. Sin embargo, cuando la frecuencia de muestreo se modifica de $2f_{sc}$ a $4f_{sc}$ persisten las pequeñas degradaciones inherentes al muestreo a $2f_{sc}$; no obstante, el efecto sobre la resolución no es acumulativo.

3.1.5 Tolerancia de las frecuencias de muestreo

Las frecuencias de muestreo utilizadas deben cumplir los requisitos de los sistemas de televisión asociados. En particular, la tolerancia para las frecuencias de muestreo de las señales componentes debe ser igual a la tolerancia para la frecuencia de línea de la norma de televisión de color pertinente [CCIR, 1982-86e, f].

En los casos en que las frecuencias de muestreo se generen a partir de la señal de sincronización de referencia procedente de un generador de sincronización principal alejado, podrían resultar útiles unas señales de sincronización centralizadas especiales con paquetes de frecuencias de referencia, para aumentar la estabilidad de fase de las frecuencias generadas [CCIR, 1986-90d].

3.2 MIC lineal

El tipo básico de codificación digital es la MIC lineal, en la cual el valor de cada «palabra» digital representa la amplitud cuantificada uniformemente de una muestra de la señal de banda base [CCIR, 1970-74a y b].

En [CCIR, 1974-78i] se presentan los resultados preliminares de un experimento efectuado utilizando 7 códecs MIC en cascada para codificar señales NTSC compuestas.

En [CCIR, 1978-82q] se describen experimentos para determinar las degradaciones de la imagen introducidas cuando se utilizan hasta 10 códecs. Las señales NTSC compuestas se codificaron utilizando varios números de bits por muestra, y las frecuencias de muestreo fueron $3 f_{sc}$ y $4 f_{sc}$. La relación señal/ruido de la fuente fue elevada.

Un estudio sobre códecs MIC utilizando 8 bits por muestra [CCIR, 1982-86g y Devereux, 1983] indica la importancia de la calidad de funcionamiento del codificador/decodificador básico y de los circuitos asociados al determinar el funcionamiento de una cadena de códecs en cascada. Revisten particular importancia los siguientes factores: filtros anteriores y posteriores; estabilización del nivel de supresión; distorsión de cuantificación, sobre todo en señales con subidas o bajadas muy pronunciadas; temblores de fase de la señal de reloj; no linealidad en frecuencias medias. En un códec bien diseñado donde se tengan en cuenta todos estos requisitos, probablemente la degradación dominante la constituya el ruido de cuantificación que, según se ha demostrado, es unos 2 dB peor que el teórico en los códecs ensayados. Se muestra una conexión en cascada de 8 códecs para aumentar el ruido de cuantificación aproximadamente en los 9 dB previstos.

La experiencia sugiere que, dentro del equipo de tratamiento de las señales MIC, deben conservarse más de 8 bits por muestra para evitar una rápida acumulación de la distorsión de cuantificación resultante del redondeo repetido después de cada proceso aritmético. Ahora bien, se ha observado que 8 bits por muestra es un valor satisfactorio para las interconexiones entre equipos que utilizan las señales Y , C_R , C_B digitales codificadas conforme a la Recomendación 601, siempre que se aplique un redondeo efectivo al pasar de un número superior de bits a 8 bits en la salida del equipo [Croll, Devereux y Weston, 1987]. describen una forma apropiada de redondeo, denominada realimentación del error, en la que esos bits de menor significado truncados procedentes de una muestra se añaden a la muestra siguiente antes del truncado, con lo cual se acumulan los restos de menor significado en lugar de eliminarlos. Con 8 bits por muestra, las señales de redondeo producen de este modo distorsiones de cuantificación de frecuencia superior que no son visibles, mientras que el simple truncado puede provocar un reborde visible.

4. Bibliografía

Además de las referencias citadas expresamente en el texto, se acompaña como apéndice una bibliografía de varias publicaciones sobre el tema de la televisión digital. Los documentos de referencia no se repiten en la bibliografía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CLARKE, C.K.P. [1986] Colour encoding and decoding techniques for line-locked sampled PAL and NTSC television signals. BBC Research Department Report N^o BBC RD 1986/2.

CLARKE, C.K.P. [1988] - PAL decoding: multi-dimensional filter design for chrominance-luminance separation. BBC Research Department Report N^o BBC RD 1988/11.

CROLL, M.G., DEVEREUX, V.G. y WESTON, M. [septiembre, 1987]. Accommodating the residue of processed or computed digital video signals within the 8 bit CCIR Recommendation 601. BBC Research Department. Report RD 1987/12.

DEVEREUX, V.G. y PHILLIPS, G.J. [1974] Bit-rate reduction of digital video signals using differential PCM techniques. IEE Conf. Publ., No. 119, 83-89.

DEVEREUX, V.G. [junio de 1983] Performance of cascaded video PCM codecs. *EBU Rev. Tech.*, 199, 114-130.

DEVEREUX, V.G. [1987] - Limiting of YUV digital video signals. BBC Research Department Report N^o BBC RD 1987/22.

MESSERSCHMID, U. [1969] Bandbreitenreduktion bei der Fernsehübertragung durch Verringerung der Abtastfrequenz (Reducción de la anchura de banda para la transmisión de televisión mediante disminución de la frecuencia de muestreo). *NTZ*, Vol. 22, 9, 515-521.

NISHIZAWA, T., YUYAMA, I., OKADA, K., TANAKA, Y., KUBOTA, K. e ISHIDA, J. [septiembre de 1981] Experimental component coding system. NHK Lab. Note, 264.

PATEL, B.R. [marzo de 1980] Effect of sharp cut-off video-frequency filters on chrominance signal in PAL colour television. *Radio Electron. Engr.*, Vol. 50, 3, 117-121.

ROSSI, J.P. [enero de 1976] Sub-Nyquist encoded NTSC colour television. *SMPTE J*, Vol. 85, 1, 1-6.

ROSSI, J.P. [octubre de 1981] A simple family of digital filters for a binary hierarchy. *SMPTE J*, Vol. 90, 10, 956-959.

STOTT, J.H. y PHILLIPS, G.J. [1977] Digital video: multiple sub-Nyquist coding. BBC Research Department Report No. 1977/21.

Documentos del CCIR

[1970-74]: a. 11/246 (Reino Unido); b. 11/298 (Japón).

[1974-78]: a. 11/64 (Japón); b. 11/354 (Japón); c. 11/374 (UER); d. 11/354 (Francia); e. 11/317 (Japón); f. 11/314 (Japón); g. 11/329 (Estados Unidos de América); h. 11/410 (Reino Unido); i. 11/331 (Estados Unidos de América); j. 11/409 (URSS); k. 11/65 (Francia); l. 11/330 (Estados Unidos de América).

[1978-82]: a. 11/36 (Reino Unido); b. 11/14 (UER); c. 11/15 (UER); d. 11/330 (UER); e. 11/328 (URSS); f. 11/285 (UER); g. 11/292 (Estados Unidos de América); h. 11/339 (OIRT); i. 11/342 (Canadá); j. 11/344 (Japón); k. 11/31 (Estados Unidos de América); l. 11/16 (UER); m. 11/114 (Francia); n. 11/33 (Estados Unidos de América); o. 11/343 (Japón); p. 11/278 (Alemania (República Federal de)); q. 11/80 (Japón); r. 11/87 (Japón); s. 11/248 (Japón).

[1982-86]: a. 11/22 (Japón); b. 11/90 (URSS); c. 11/81 (Reino Unido); d. 11/23 (Japón); e. 11/46 (UER); f. 11/135 (OIRT); g. 11/65 (Reino Unido); h. 11/19 (Japón); i. 11/26 (Japón).

[1986-90]: a. 11/323 (Relator Principal del GIT 11/7); b. 11/545 (Francia); c. 11/185 (URSS); d. 11/86 (URSS).

BIBLIOGRAFÍA

- AKRICH, C. y ZACCARIAN, P. [junio de 1981] Productions requirements for digital television systems. *EBU Rev. Tech.*, **187**.
- BALDWIN, J. L. E. [septiembre de 1976] Sampling frequencies for digital coding of television signals. *IBA Tech. Rev.*, **9**, 32-36.
- BALDWIN, J. L. E., STALLEY, A. D. y KITCHIN, H. D. [junio de 1973] A standards converter using digital techniques. *IBA Tech. Rev.*, **3**, 15-29.
- CLARKE, C. K. P. [6-7 de febrero de 1981] Digital decoding of PAL and NTSC signals using field delay comb filters and line-lock sampling. *Television Technology in the 80's*. SMPTE, Scarsdale, NY 10583, 200-206. 15th Annual SMPTE Television Conference, San Francisco, Estados Unidos de América.
- DAVIDOFF, F. [marzo de 1977] An update of digital television fundamentals. SMPTE, *Digital Video*, Vol. I.
- GRUDZINSKY, M. A., TSUKKERMAN, I. I. y SHOSTATSKY, N. N. [1978] Diskretizatsiya TV izobrazhenii pri tsifrovom kodirovaniy (Muestreo de imágenes de TV con codificación digital). *Tekhnika kino i Televideniya*, **11**.
- IGNATEV, N. K. [1961] Optimalnaya diskretizatsiya drymernykh soobshchenii (Muestreo óptimo de comunicaciones bidimensionales). *Radiotekhnika*, Vol. **4**, **6**.
- JONES, A. H. [1979] Digital video: coding techniques and trade-offs. 11th International TV Symposium, Montreux, Suiza.
- KARWOWSKA-LAMPARSKA, A. [1980] Wplyw metod próbkowania sygnału wizyjnego na jakość odtwarzanego obrazu (Influencia de los métodos de muestreo de la señal video en la calidad de las imágenes reproducidas). *Archiwum Elektrotechniki*, **4**, 865-876.
- KARWOWSKA-LAMPARSKA, A. [1984] Telewizyjne systemy cyfrowe (Sistemas de televisión digital). Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Varsovia, Polonia (República Popular de).
- KHLEBORODOV, V. A. [1984] - Ekonomichnyi TV standard 2 2/3: 1 1/3: 1 1/3 (A Cost-Effective 2 2/3: 1 1/3: 1 1/3 TV Standard). In: 1st All-Union Scientific and Technical Conference: Improvements of Technical Means, Management and Planning for TV and Sound Broadcasting (VNIITR), Moscow, USSR.
- KRIVOSHEEV, M. I. y otros [1980] *Tsifrovoye televidenie* (Televisión digital). Publicado por Sviaz, Moscú, URSS.
- LUCAS, K. [septiembre de 1979] Sampling frequencies for digital PAL decoding. IBA Report 104/79.
- OVCHINNIKOV, E. K., PEVSNER, B. M., ROSSELEVICH, I. A., SARDYKO, S. V., TIMOFEYEV, V. E. y TSUKKERMAN, I. I. [1976] Tsifrovoye kodirovaniye televizionnykh izobrazheniy i perspektivy ispolzovaniya yego na teletsentrah (Codificación digital de imágenes de televisión y perspectivas para su utilización en los centros de TV). *Tekhnika sredstv svyazi* en la serie *Tekhnika Televideniya*, **4**, 20-31.
- PEVSNER, B. M. y TSUKKERMAN, I. I. [1977] O normakh na tsifrovoye kodirovaniye signalov dlya TV tsentrov chetyvortogo pokoleniya (Normas para la codificación digital de señales para los centros de TV de la cuarta generación). *Tekhnika kino i Televideniya*, **9**, 49-51.
- PTACEK, M. [mayo de 1977] Digital television transmission systems. *Radio Telev. (OIRT)*, **2**, 27-38.
- SABATIER, J. y KRETZ, F. [octubre de 1978] Sampling the components of 625-line colour television signals. *EBU Rev. Tech.*, **171**.
- SMPTE [marzo de 1977, marzo de 1979 y marzo de 1980] *Digital Video*. Vols. I, II y III.
- SOROKA, E. Z. y KHLEBORODOV, V. A. [1980] Trekhmernye spektry polnykh tsvetovykh videosignalov (Espectros tridimensionales de señales video de color compuestas). *Tekhnika sredstv svyazi* en la serie *Tekhnika Televideniya*, **3**, 23.
- TONGE, G. J. [1981] The sampling of television images. UKIBA experimental and development Report 112/81.
- TSUKKERMAN, I. I. y otros [1981] Tsifrovoye kodirovaniye televizionnykh izobrazheniy (Codificación digital de imágenes de TV). *Radio i svyaz*, Moscú, URSS.
- VILENCHIK, L. S., PALITSKY, V. M. y SOLOVEV, V. M. [1978] Tsifrovaya peredacha signalov televizionnykh programm po coedinitelnym liniyam (Transmisión digital de señales de TV por líneas de enlace). *Tekhnika kino i Televideniya*, **12**.
- WENDLAND, B. [30 de mayo-4 de junio de 1981] Lines of development for future television systems. 12th International Television Symposium, Montreux, Suiza.
- Documentos del CCIR*
 [1974-78]: 11/147 (URSS).
 [1978-82]: 11/297 (UER); 11/293 (Estados Unidos de América); 11/249 (Japón).
 [1982-86]: 11/378 (Canadá); 11/314 (Francia).