

transmisión de imágenes de TV por métodos digitales

las técnicas diferenciales

En este tercer capítulo se consideran las técnicas diferenciales como alternativas a las de transformación, además de métodos duales e híbridos. Las técnicas diferenciales ofrecen las especiales ventajas de su notable sencillez y de su versatilidad, lo que las coloca, a nuestro juicio, en las mejores condiciones para su pronta aplicación. Se tratan también algunos problemas relacionados, como el importante de los efectos de los errores de transmisión.

Aníbal R. Figueiras, José B. Mariño

TV TRANSMISSION USING DIGITAL SYSTEMS. Differential Techniques

In this third paper, we deal with differential techniques as alternative to transforms, besides dual and hybrid methods. Differential techniques offer special advantages: remarkable simplicity and flexibility; these reasons allow us to conclude that they are in the best conditions for their immediate application.

We also deal with some related problems, as the effects of transmission errors, a very important factor in the overall quality evaluation.

INTRODUCCION

Habiendo expuesto previamente los resultados de la comparación entre técnicas de transformación y diferenciales, conviene insistir aquí en que las segundas son de instrumentación mucho más sencilla (sobre todo, porque su aplicación directa da lugar a un régimen binario constante), y, analítica y prácticamente, de fácil modificación y adaptación a circunstancias particulares. Así, la actual tecnología posiblemente obligue al empleo de los procedimientos diferenciales (y sus variantes), en una primera época al menos, en los problemas específicos de transmisión comercial de señal de video; dado que, en estos casos, es fundamental disponer de un receptor simple. Tan sólo las transformaciones de Walsh y Haar trabajando sobre subimágenes de dimensiones reducidas pueden tener alguna opción en este terreno.

En otras aplicaciones (por ejemplo, exploración espacial, almacenamiento de información) en las que la complejidad del receptor puede negociarse frente a los problemas de calidad o volumen de memoria, las transformaciones más elaboradas cuentan con mayor ventaja.

La posibilidad de recurrir a técnicas auxiliares (submuestras, adaptación, etc.) ha facilitado el alcanzar cotas de calidad subjetivamente aceptables con ambas técnicas en la transmisión de video. Debe señalarse, además, que la digitización da lugar a degradaciones sensiblemente diferentes, entre las que existen compromisos; permitiendo las variantes de los sistemas trabajar con diversos balances entre tales degradaciones; por lo que no se puede establecer un orden de prioridad entre transformaciones y técnicas diferenciales en cuanto a calidad, salvo en un sentido muy general.

Aprovechando el haber comentado la presencia de diversos problemas de calidad en una imagen digitizada, citaremos los más importantes [1]:

— *Granularidad*: defecto mostrado cuando la digitización en un tramo de seguimiento «enganchado» resulta excesivamente grosera (la figura 1 muestra un tramo de seguimiento enganchado en un D.P.C.M. de 4 niveles). Uno de los efectos subjetivos más notables es el de *contorneo*, o introducción de bordes artificiales en zonas de luminancia lentamente variable.

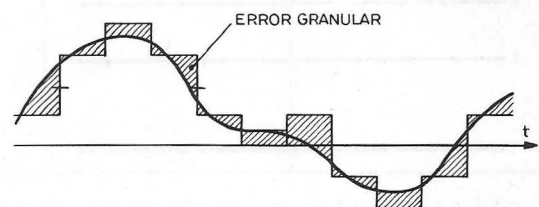


Figura 1. Región de seguimiento enganchado, D.P.C.M. a 2 bits

— *Sobrecarga de pendiente*: defecto mostrado en los tramos de pérdida de la digitización (véase la figura 2). El efecto particular más importante se conoce como *movimiento de bordes*: desplazamiento de éstos entre imágenes consecutivas al aparecer sobrecargas de pendiente en

áreas correspondientes de maneras no exactamente idénticas.

- *Escalonado de bordes*: debido a la cuantificación en el tiempo.
- *Rayado*: debido a desacoplos entre codificador y decodificador o a errores de transmisión. El nombre traduce el efecto obtenido con D.P.C.M. de predictor basado en un elemento espacial previo, o D.M. espacial; en otros casos, las manifestaciones son figuras diferentes de simples rayas (normalmente, menos apreciables).

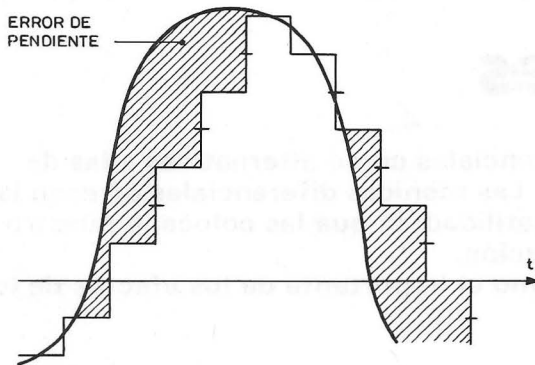


Figura 2. Dos regiones de pérdida, D.P.C.M. a 2 bits

Como se ha dicho, existen compromisos entre estos defectos y con otras características de transmisión; por ejemplo, reducir el escalonado de bordes supondría mayor régimen binario; la reducción de granularidad y sobrecarga de pendiente son objetivos contrapuestos; etc.

EL D.P.C.M. Y SUS VARIANTES

Se sabe que el D.P.C.M. aventaja al P.C.M. en situaciones de muestras fuertemente correladas. En realidad, el problema puede plantearse con cierta generalidad: si la fuente de información tiene «memoria» (es decir, si las muestras no

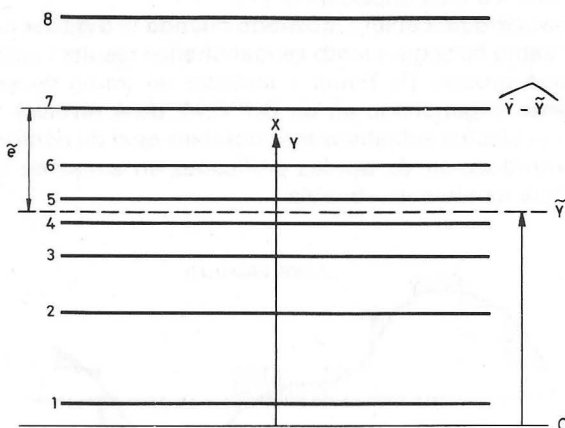


Figura 3. Cuantificación D.P.C.M. de tres bits. \hat{Y} = predictor; Y = muestra, $\hat{Y} - \tilde{Y}$ = valor cuantificado; \hat{e} = error de cuantificación; 1, 2, ... 8 = niveles cuánticos.

son independientes), se puede suponer que, cada vez que se va a obtener una muestra, dicha fuente se encuentra en un estado de entre varios posibles, s_i de $\{s_j\}$, y que el valor de la muestra que se obtiene depende estadísticamente de dicho

estado. Si se desea optimizar el sistema, el cuantificador debe diseñarse de acuerdo con los diversos estados.

Esto es el fundamento del *A.P.C.M.* (P.C.M. adaptativo). Pero la optimización genérica propuesta presenta varias dificultades: fundamentalmente, la caracterización de la fuente según sus diversos estados (los autores discrepan incluso con una simplificación markoviana [2], [3]), y también la dificultad de construcción de un cuantificador adaptativo general. Por ello, sólo se emplea con notables simplificaciones; como una de ellas puede considerarse el D.P.C.M. [4]: en este caso, se centra el cuantificador sobre una predicción de $Y(mT_s)$ (figura 3), aprovechando así adecuadamente el margen dinámico del cuantificador.

Anteriormente (véase la fórmula (8) del primer artículo publicado en el N.º 78) se han analizado los predictores de tipo lineal (los no lineales presentan muchas dificultades para su aplicación práctica). Los coeficientes $\{a_i\}$ obtenidos de este modo pueden criticarse por las siguientes razones:

- Si el proceso a cuantificar no es estacionario (tal como pasa con Y) no tiene sentido hablar de la función de autocorrelación $\Psi_{yy}(\cdot)$. En tales casos, pueden utilizarse estimaciones locales de esta función, tal como han hecho

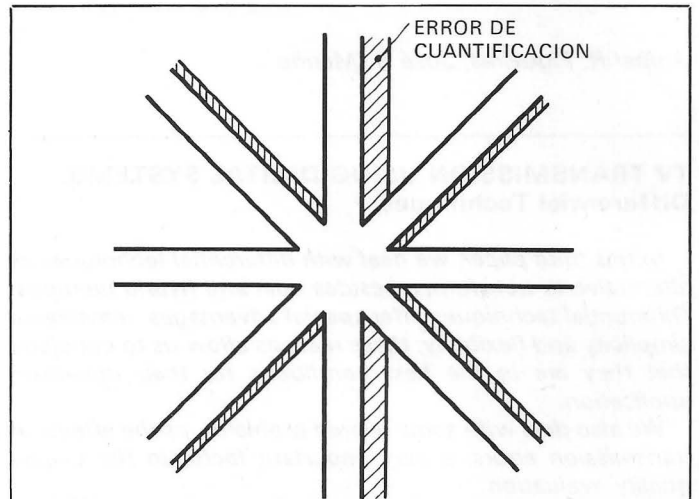


Figura 4. Imagen de prueba del error de cuantificación en E.D.P.C.M. Nótese el mayor efecto en los bordes verticales

Atal y Schroeder en el caso de voz [5] (lo que complica extraordinariamente el equipo), u otro tipo de predictores, como el de Kalman [6]. Estos procedimientos «adaptan» el predictor a la señal, y de ahí que se conozcan como *A.D.P.C.M.* (el mismo nombre reciben los D.P.C.M. que adaptan características distintas del predictor).

- El criterio de error aplicado en los cálculos previos es el cuadrático medio, no subjetivo ([4], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]). Por ello, los coeficientes se escogen por razones de sencillez o tras pruebas de evaluación subjetiva.

Puede comprobarse en gran cantidad de trabajos (por ejemplo, [2], [3], [4], [8], [16], [17], [18]), como, en todo caso, dichos coeficientes se escogen como fracciones sencillas. Los predictores inicialmente utilizados recurrían a los elementos previos en la línea del que se cuantifica (predicción *horizontal unidimensional*, *H1D*; se dice *elemental* si usa sólo el elemento adyacente). Estos esquemas son sencillos, pero distorsionan sensiblemente las áreas detalladas, especialmente, los bordes verticales (figura 4). Añadir

elementos de la línea superior del mismo cuadro (predicción *espacial bidimensional*, *S2D*) mejora sensiblemente la calidad. La predicción en el sentido *temporal* (de trama a trama) mejora la reproducción de las áreas móviles; además de ofrecer mayor ventaja si se pretende codificar por longitud variable (*codificación de entropía*), asignando palabras-código más breves a niveles cuánticos más probables (lo que requiere memoria para el «alisado» de datos antes de su transmisión). Los predictores *tridimensionales*, *3D*, los más eficientes, son de más complicada implementación.

Conmutaciones y simplificaciones de los códigos para reducir el régimen binario son también posibles (hay varios en [16]; [19]).

Como se ha comentado previamente, al introducir la designación A.D. P.C.M., además de la adaptación del predictor, o sustituyendo a ésta, para un mejor funcionamiento en el caso de la señal de video (no estacionaria), es posible adaptar de modo sencillo el cuantificador; por ejemplo, normalizando la señal por su «potencia» medida localmente (cada determinado intervalo de tiempo) [20], (figura 5) o conmutando varios predictores fijos [4], utilizando para ello con preferencia procedimientos de control digital sobre los bits obtenidos de la cuantificación, lo que representa la especial ventaja de hacer innecesaria la transmisión de las señales de conmutación.

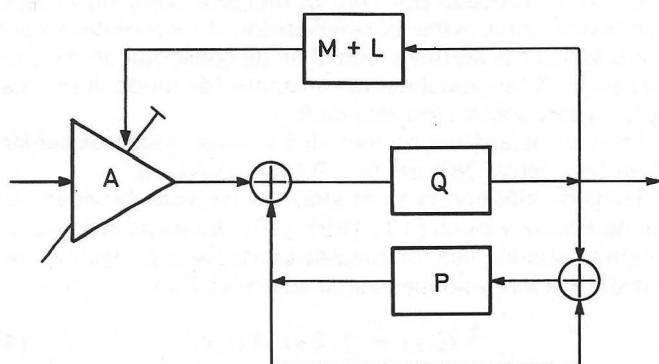


Figura 5. A.D.P.C.M. con normalización por «potencia» local (extremo de transmisión). A=amplificador de ganancia controlada; Q=cuantificador; P=predictor; M+L=memoria y lógica de cálculo

LA D.M. Y SUS VARIANTES

Los sistemas D.M. no adaptativos pronto se revelaron insuficientes para la transmisión de imagen con la calidad deseable: el compromiso entre error granular y sobrecarga de pendiente limitaba sus posibilidades. De tal observación Winkler [21] dedujo la conveniencia de adaptar el nivel del escalón cuántico, proponiendo un primer sistema A.D.M. por control digital, ya descrito en el primero de nuestros artículos. Aunque existen procedimientos de adaptación con control no digital, son menos ventajosos (precisan la transmisión de la ley de adaptación); por lo que en la literatura han proliferado los procedimientos con características análogas a las del introducido por Winkler.

De entre ellos, algunos realizan la adaptación recurriendo a una «biblioteca» de escalones cuánticos [22], [23], que se va recorriendo según los bits que se obtengan en la cuantificación. Otros emplean un algoritmo de adaptación; así, Jayant [24] propone multiplicar el nivel del escalón cuántico por P ($1 < P < 2$) cuando dos bits consecutivos

coinciden, y por $Q = 1/P$ cuando no coinciden. Nótese que la coincidencia parece, intuitivamente, implicar rápida variación de la señal, y la discrepancia, una zona de planicidad; modificándose el escalón cuántico del modo adecuado para combatir el error predominante en cada caso

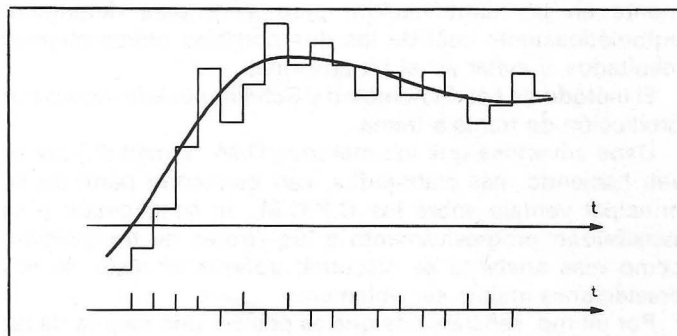


Figura 6. Mecanismo de adaptación de Jayant. Aproximación escalonada y señal transmitida

(de pendiente o granular, respectivamente). La figura 6 aclara el proceso.

La figura 7 indica una posible disposición del conversor D.M. de Jayant. Este autor optimiza los valores de P en diversos casos para conseguir error cuadrático medio mínimo.

Se han propuesto otros algoritmos de adaptación (digital) para su aplicación a señal de video, como los de Tazaki [25] y de Song, Garodnick y Schilling [26]. Este último consiste en tomar:

$$t(mT_s) = \text{sgn} [Y(mT_s) - E(\overline{m-1} T_s)] \quad (1)$$

donde t es el bit transmitido, sgn la función signo (+1/-1 para argumento positivo/negativo) y E la aproximación en escalera; con:

$$\Delta(mT_s) = |\Delta(m-1 T_s)| [t(mT_s) + t(\overline{m-1} T_s) / 2] \quad (2)$$

(siendo Δ el escalón cuántico), si $|\Delta(\overline{m-1} T_s)|$ supera un cierto nivel mínimo (en caso contrario, se emplea ésta para el nivel del escalón siguiente). Claramente:

$$E(mT_s) = E(\overline{m-1} T_s) + \Delta(mT_s) \quad (3)$$

Utilizando este esquema, Lei, Scheinberg y Schilling [26] introducen un método A.D.M. con «predicción bidimensional», proponiendo dos predictores: el elemento adyacente izquierdo y el adyacente superior (ambos cuantificados); recurriendo en cada momento al de predicción más aproxi-

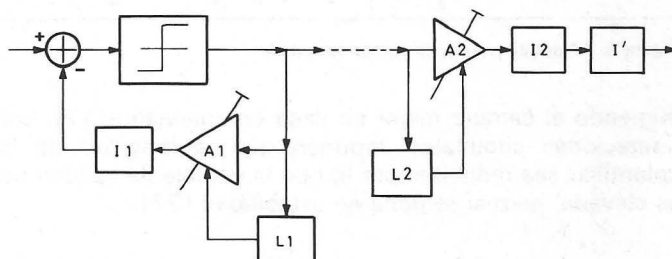


Figura 7. A.D.M. con control digital. F = detector de signo; L1, L2 = lógicas de adaptación; A1, A2 = amplificadores controlados; I1, I2 = integradores; I' = interpolador.

mada. Así se plantea el problema de que se necesita un bit adicional para indicar cuál de los dos elementos se ha utilizado. Para evitarlo, los autores también proponen un predictor auxiliar, combinación lineal de los dos anteriores y el valor cuantificado del elemento adyacente diagonal izquierdo previo. Este predictor no puede utilizarse directamente en la cuantificación, pero sirve para determinar automáticamente cuál de los dos primeros ofrece mejores resultados, y evitar así el bit adicional.

El método de Lei, Scheinberg y Schilling puede incorporar predicción de trama a trama.

Debe advertirse que los métodos D.M., a medida que se van haciendo más elaborados, van perdiendo parte de su principal ventaja sobre los D.P.C.M., la simplicidad; y se sensibilizan progresivamente a los errores de transmisión, como más adelante se discutirá; aunque el resto de sus prestaciones mejora sensiblemente.

Por último, señalaremos que es posible una mejora de las características de la cuantificación delta (u otras) recurriendo a la *codificación retardada*: consiste ésta esencialmente en no transmitir los bits hasta que se compruebe que el escalonado consiguiente sigue correctamente a la señal en tiempos posteriores, de acuerdo con cualquier criterio; si el seguimiento es incorrecto, se cambian los bits a transmitir. El proceso se realiza comparando una «plantilla» del escalonado posible en cada instante (figura 8) con la señal y

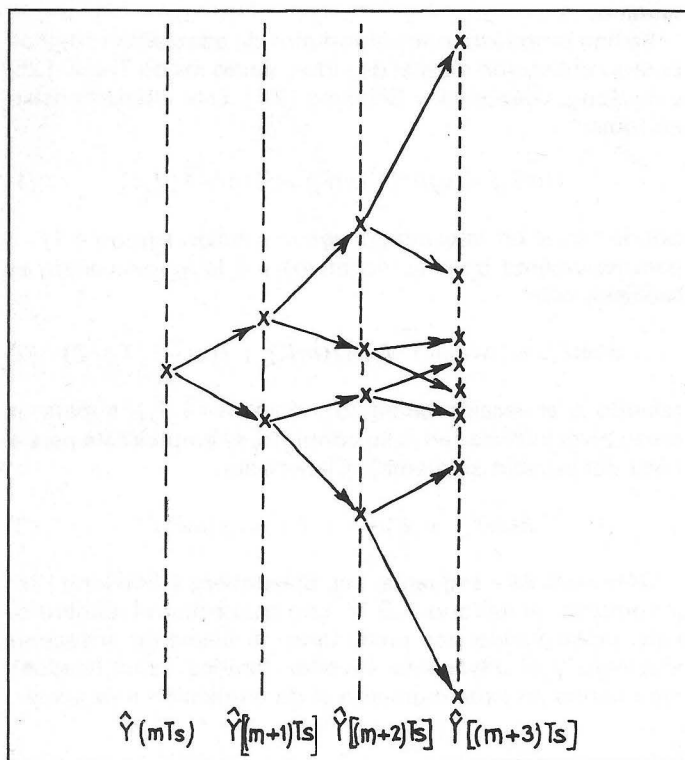


Figura 8. Plantilla para codificación retardada

eligiendo el camino mejor en cada comparación [17]. Las limitaciones circuitalas imponen que la longitud de la «plantilla» sea reducida, por lo que la ventaja de calidad no es elevada, pero sí se gana en estabilidad [27].

TECNICAS DUALES E HIBRIDAS

Acostumbran a designarse como duales las técnicas que

emplean alternadamente D.P.C.M. y D.M. (nosotros lo extenderemos a los casos P.C.M. y D.P.C.M.); y por híbridas, las mixtas transformación-diferenciales. Es fácil comprender que sus posibilidades son considerables, aprovechando las mejores características de cada componente.

Una completa descripción de un sistema dual se hace en [1]. El equipo emplea la D.M. sobre áreas poco variables, y el D.P.C.M. en áreas variables, conmutando por comparación de la señal diferencia entre muestras con un umbral (en la

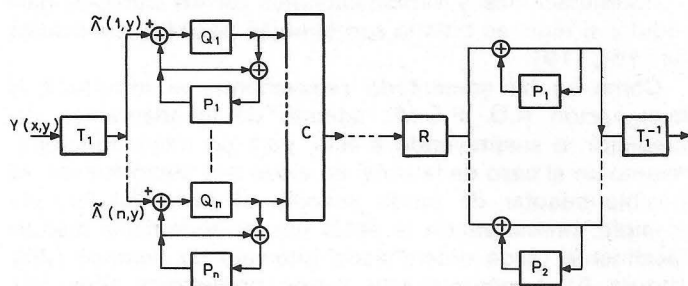


Figura 9. Esquema básico de técnica híbrida de transformación unidimensional más D.P.C.M. T_1, T_1^{-1} = transformaciones directa e inversa, unidimensionales; Q_i = cuantificadores; P_i = predictores; C = codificador; R = receptor digital.

práctica, se procede por control digital a partir de la señal codificada, para evitar la señalización de conmutaciones). Los bits delta se agrupan, con el fin de conseguir un régimen de señalización globalmente constante (de modo aproximado), y usa codificación retardada.

Entre otros análisis de métodos duales, podemos señalar el de Devereux [28], del tipo P.C.M.-D.P.C.M.

Trabajos clásicos comentando las técnicas híbridas son los de Habibi y otros [18], [29], [30]. En estos artículos se examina una técnica intertramas consistente en realizar una transformación unidimensional sobre las filas:

$$\tilde{\underline{X}}(u,y) = \underline{T}(x,u) \underline{Y}(x,y), \quad (4)$$

siendo \underline{T} la matriz que define la transformación unidimensional; y tras ello, en aplicar un D.P.C.M. para cada u , reduciendo así la redundancia según la coordenada y . La figura 9 esquematiza el sistema (se usan predictores de longitud unidad). El procedimiento disfruta de ventajas de la cuantificación D.P.C.M. y por transformación.

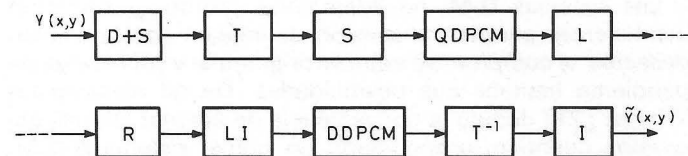


Figura 10. Diagrama de bloques de técnica híbrida por serialización de subbloques. $D+S$ = divisor en sub-bloques y secuenciador; T, T^{-1} = transformadores bidimensionales; $QDPCM$ = cuantificadores diferenciales de elementos correspondientes; L = lógica para eliminación de redundancia; R = receptor digital; LI = lógica de identificación; $DDPCM$ = demodulador DPCM; I = interpolador

En [29] se hace notar también que las técnicas híbridas se pueden aplicar a digitización intertramas; por ejemplo, con transformación bidimensional en cada trama y posterior D.P.C.M. de trama a trama; aunque se obtiene peor calidad. Una variante de esto es aquella en la que las transformacio-

nes bidimensionales se aplican sobre sub-bloques de imágenes presentados sucesivamente, y la D.P.C.M., entre los sub-bloques transformados (figura 10). [31] recoge resultados de una interesante labor comparativa, tratando con las transformaciones de Walsh, Haar y Walsh-Haar sobre sub-bloques 16×16 de imágenes 256×256 . Los autores comprueban mayor calidad que con los métodos bidimensionales directos con una compresión de valor 4, además de ahorrar tiempo de CPU en la simulación (lo que equivaldría a una más simple circuitería en una realización práctica).

REDUCCIONES E INTERCAMBIOS DE RESOLUCION

En una imagen digitalizada puede considerarse tres clases de resolución:

- *de detalle*, proporcional al número de bits de la cuantificación;
- *espacial*, proporcional al número de puntos por trama;
- *temporal*, proporcional al número de tramas por unidad de tiempo.

Como se ha discutido, hay efectos subjetivos que tienden a enmascarar la disminución de cada una de estas resoluciones bajo determinadas circunstancias. Esto puede aprovecharse para intercambiarlas de acuerdo con su importancia en cada instante, o bien para reducirlas directamente en los casos en que sea posible.

La reducción de resolución puntual o de detalle consiste en limitar el número de bits por muestra. Las reducciones de resolución en tiempo y en espacio son técnicas sencillas, que, en su forma más elemental, consisten en prescindir de parte de las muestras de video, y repetir o interpolar otras de valores semejantes (en espacio o en tiempo) en el receptor. Así, en [17] y [32] se dan ejemplos de transmisión de puntos en cada trama de acuerdo con una agrupación previa (figura 11); repitiendo las subtramas para evitar el parpadeo

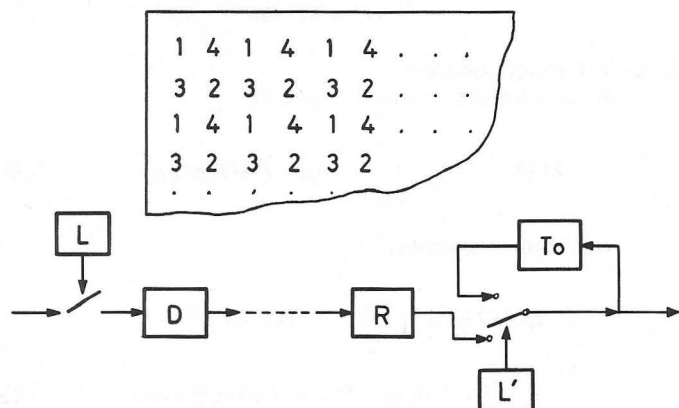


Figura 11. Ejemplo de agrupación de puntos para relleno selectivo, y realización básica de transmisor y receptor. L, L' = lógicas de selección; D = digitalizador; R = reconstructor de señal; T_0 = retardo de trama.

de la imagen. Esta técnica recibe la denominación de *relleno selectivo*; y presenta como principal problema que los perfiles de las agrupaciones de puntos se hacen visibles en casos de movimiento rápido.

También en [17] se nos habla de repetición, promediado e interpolación de tramas.

Las reducciones de resolución espacial y temporal que se

acaban de considerar pueden utilizarse de modo complementario: intercambiando una y otra según se encuentre el digitizador con sucesiones de imágenes sensiblemente «fijas» o rápidamente móviles. Un ejemplo de aplicación es el DRIDEC, básicamente un codificador D.P.C.M. con predictor usando el elemento previo, que, en modo estacionario, interpola entre tramas, y, en modo móvil, interpola entre líneas, del modo que muestra la figura 12 (nótese que la presentación se hace en campos interlazados).

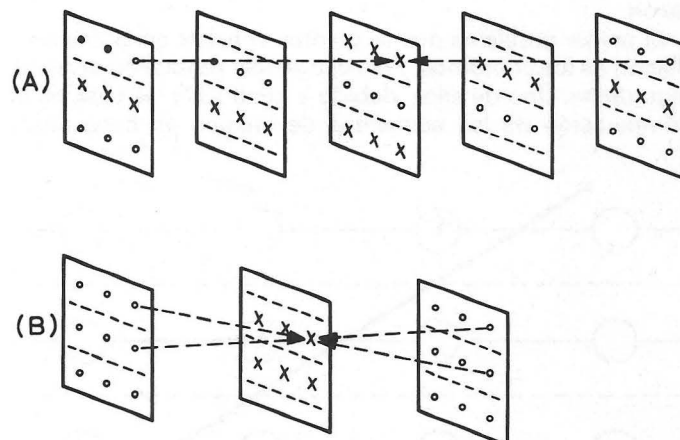


Figura 12. Modos de trabajo del CRIDEC. Las flechas muestran los elementos para interpolación en un caso; en los demás, se procede idénticamente. A = modo estacionario; B = modo móvil; (.) = valores transmitidos; (x) = valores interpolados.

Una importante técnica que se puede considerar incluida dentro de éstas (que son, esencialmente, procedimientos de submuestreo) y profusamente considerado (por ejemplo, [17], [33], [34]) es la conocida por *relleno condicional*: que consiste en transmitir únicamente los elementos que han variado sensiblemente entre tramas sucesivas. Se hace precisa una información que dirija los elementos transmitidos; y el procedimiento es, además, sensiblemente asíncrono; con lo cual se establece el típico compromiso entre capacidad del medio de transmisión y requerimientos de memoria. Una solución aceptable a este problema la proporciona el FRODEC, que reduce a la mitad la resolución espacial y eleva el umbral para la selección de elementos móviles cuando la memoria de alisado de datos se llena; si se rebasa la capacidad de dicha memoria, se repite una trama, y se pasa a transmitir una tira P.C.M. si la memoria se vacía [17].

CLASIFICACION (SEGMENTACION) PREVIA

Otra manera de enfocar el problema de mantener las resoluciones espacial-de detalle (aquí agrupados) y temporal tan reducidas como lo permita la visión de las imágenes (para una «calidad subjetiva» dada) consiste en proceder a una clasificación (o segmentación) previa de los elementos de imagen en categorías según sus características de detalle o de movilidad; digitizando después cada categoría por separado, de acuerdo con sus especiales características. En realidad, puede considerarse el relleno condicional como una segmentación elemental.

Analizaremos primero una forma de segmentación que trabaja según las coordenadas espaciales. Schreiber, Huang y Tretiak [35] manifiestan elegantemente cómo el hombre basa su observación visual fundamentalmente en los

contornos. Por ello, proponen considerar la señal como información de contornos, y utilizar ésta y el conocimiento del gradiente de la luminancia para la recuperación de la imagen (*codificación de contorno*). Aunque el proceso equivale teóricamente a transmitir contornos por un lado y valores medios de luminancia (señal de banda mucho más reducida) por otro, tal como propone Graham [36] (*codificación por áreas*), los autores anteriormente citados insisten en que hay diferencia subjetiva entre ambos métodos, y los resultados de diversas experimentaciones parecen darles la razón.

El primer problema que se plantea consiste en la determinación de los contornos. Para ello se han propuesto diversos algoritmos. Uno de ellos, debido a Limb [37], se basa en la comparación de los elementos de imagen en cada línea,

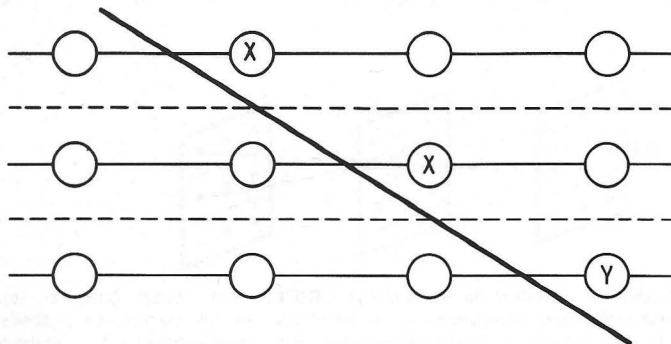


Figura 13. Predicción por contorno. (—) = contorno previsto; y = elemento a cuantificar; x = predictores según contorno; (---) = líneas del segundo campo.

examinándolos de ocho en ocho. Existen otros métodos más depurados, como el de Wilkins y Wintz [38], consistente en un algoritmo doble, con una primera parte para determinar puntos iniciales en un contorno, y una segunda parte para seguir éste (lo que requiere un número máximo de bits igual a 3, designando los ocho elementos adyacentes; puede reducirse dicho número para mayor compresión). Este segundo tipo de algoritmos reviste cierta complejidad: se basan en un test de hipótesis apoyado en la estimación de valores estadísticos de sub-bloques de imagen para el agrupamiento, siendo los criterios de éste actualizables de acuerdo con los datos que suministre cada bloque clasificado, de modo que el clasificador es adaptativo. Aunque se han realizado pruebas con este método y cuantificación bloque (simultánea de cierto número de muestras) [39], las dificultades tecnológicas seguramente limitarán su aplicación práctica.

Dentro de las técnicas de codificación por contorno, la transmisión de éste es un problema especial. Puede hacerse por *codificación de desplazamiento*, fijando cada punto respecto del anterior; o examinando en cada momento la dirección del contorno (precisos 3 bits como máximo) o acoplando curvas conocidas a un determinado contorno [35].

Un procedimiento íntimamente ligado al anterior es el de *predicción por contorno*, detallado por Zschunke [40]. En él, las diferencias entre los elementos de la misma línea sirven para ir marcando los contornos línea a línea, previendo así su trazado, y utilizando para una cuantificación D.P.C.M. los elementos según el contorno como bases para la predicción (figura 13).

Existen otros modos de segmentación más elaborados, basados en análisis espectral, en comparaciones hasta en

tres dimensiones, en separación detalle-textura, o en modelos de efectos subjetivos [10], [17], [41], [42].

CONSIDERACION DE EFECTOS SUBJETIVOS

En el diseño de cuantificadores se han tenido también en cuenta las características de la visión. Así, Netravali, Rubinstein y Sharma [11] [12] consideran en función de la pendiente de luminancia, p , un *umbral de percepción*, $T(p)$, de variaciones en dicha pendiente (magnitud fundamental en la cuantificación diferencial), y una *función de visibilidad*, introducida como dependiente del umbral de percepción, $f(T)$, tal que marca la correspondencia entre un cierto error en la pendiente de luminancia y un ruido blanco repartido sobre toda la imagen subjetivamente igual; habiéndose encontrado que los efectos del ruido son aditivos, y teniendo $f(T)$ carácter de función de densidad, se determina en la forma:

$$P_B = \int_T^\infty f(T') dT' P_p; \quad (5)$$

donde P_B y P_p indican las potencias de ruido blanco y de pendiente equivalente. Con $T(p)$ y $f(T)$ estos autores proponen varios diseños óptimos, sobre los que aplican como criterios de error:

— el cuadrático medio:

$$MSE = \sum_i \int_{P_i}^{P_{i+1}} (p - \hat{P}_i)^2 g(p) dp \quad (6)$$

siendo $g(\cdot)$ la densidad de probabilidad de p , P_i los niveles de decisión y \hat{P}_i los cuánticos;

— el cuadrático medio sobre el umbral:

$$MSTE = \sum_i \int_{P_i}^{P_{i+1}} [(p - \hat{P}_i)^2 - T^2(p)] u[|p - \hat{P}_i| - T(p)] g(p) dp; \quad (7)$$

(u es la función escalón);

— el «cuadrático medio subjetivo»:

$$MSSE = \sum_i \int_{P_i}^{P_{i+1}} (p - \hat{P}_i)^2 f(p) dp; \quad (8)$$

— idem sobre el umbral:

$$MSSTE = \sum_i \int_{P_i}^{P_{i+1}} [(p - \hat{P}_i)^2 - T^2(p)] u[|p - \hat{P}_i| - T(p)] f(p) dp \quad (9)$$

Unos de los diseños propuestos son los resultados de minimizar estas medidas para un número de niveles o una entropía de salida prefijados. También se proponen cuantificadores que mantienen los errores por debajo del umbral de percepción. Encuentran que el cuarto criterio y las minimizaciones según él son las subjetivamente más aceptables, como era de esperar. En otro trabajo [10] el mismo grupo de autores propone la consideración de funciones de visibilidad definidas no según p , sino según expresiones más elaboradas que miden la «actividad» de la luminancia en un entorno de cada imagen: *funciones de enmascaramiento*; conside-

rando ejemplos uni y bidimensionales, causales y no causales. Un ejemplo general de estas funciones es la máscara bidimensional

$$M(x_0, y_0) = \frac{1}{2} \sum_{m=x_0-1}^{x_0+1} \sum_{n=y_0-k}^{y_0+k} \alpha^{d[(m,n), (x_0, y_0)]} (|p^H(x_0, y_0)| + |p^V(x_0, y_0)|) \quad (10)$$

donde d indica distancia euclídea, $\alpha (<1)$ es un factor ponderal, y p^H, p^V , significan pendiente horizontal y vertical.

En este y otros trabajos [9], [11] se proponen otros varios diseños combinados con A.D.P.C.M. por clasificación; diseñando los cuantificadores uniformes óptimos para cada clase, cuyos escalones para la clase i (compuesta por sectores de igual «visibilidad») serán de la forma:

$$\Delta_i = \text{constante} \times \bar{f}_i^{-1/2} \quad (11)$$

siendo \bar{f}_i una aproximación segmentada a la función de visibilidad en el tramo correspondiente a la clase i . Otros diseños minimizan el error cuadrático medio subjetivo, o

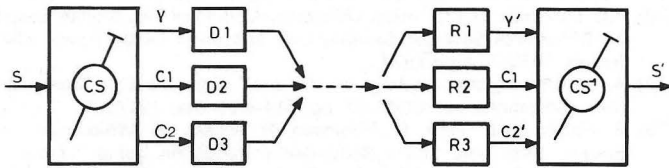


Figura 14. Codificación de componentes de imagen de color. S, S' = señal de color y su reconstrucción; Y, C₁, C₂; Y', C₁, C₂' = componentes y reconstrucciones; CS, CS⁻¹ = separador de componentes e inverso ajustables; D₁, D₂, D₃ = digitizadores; R₁, R₂, R₃ = reconstructores.

simplemente el cuadrático medio, sobre cada clase, trabajando con el error de predicción y clasificando las señales según valores de las funciones de enmascaramiento.

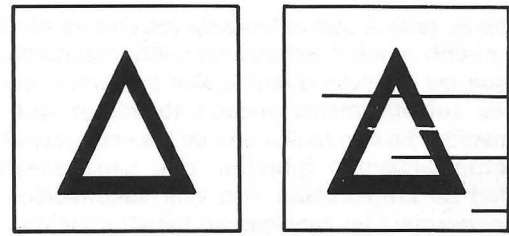
Otros interesantes estudios sobre cuantificaciones subjetivamente óptimas corresponden a Thoma [13] y Kretz [14].

BREVE NOTA SOBRE LA DIGITIZACION DE IMAGENES EN COLOR

Se brindan inicialmente dos opciones: actuar sobre la señal compuesta directamente, o sobre las tres componentes por separado (Y se escoge como una de ellas, para garantizar la compatibilidad).

La *codificación de señal compuesta* no ha ofrecido buenos resultados prácticos salvo en el caso de la señal PAL. Presenta problemas de intercambio entre sistemas; pero, en las redes mixtas A-D actuales, evita pasos de conversión que tienden a degradar la señal.

Quizá el más completo trabajo sobre digitización de señal compuesta se deba a Thompson [8]. Recurre a D.P.C.M. sobre la señal compuesta, utilizando para los predictores elementos previos en los que la subportadora de luminancia esté en fase con respecto a la que tiene en el elemento a cuantificar. El problema adicional en PAL de la alternancia de la componente V se puede solucionar de tres modos distintos: conmutando adecuadamente el predictor, utilizando elementos de predicción escogidos en la segunda línea previa, o recurriendo al *predictor de crominancia corregida*: usando la luminancia de elementos inmediatos y la crominancia de otros con la fase adecuada.



(A)

(B)

Figura 15. Efectos de los errores de canal en cuantificación diferencial con predictor previo horizontal. A = señal original; B = señal recuperada.

La codificación por componentes, mucho más versátil, solventa el problema de intercambio entre sistemas, y facilita las modificaciones del procedimiento. Las componentes se escogen como Y, C₁, C₂ (las dos últimas para color) (el esquema genérico sería el de la figura 14); y resulta teóricamente posible seleccionar C₁ y C₂ de modo que exista incorrelación entre las tres, con las típicas ventajas de una transformación de Hotelling; pero el resultado es muy semejante al Y, I, Q, por lo que suele acudir a éstas [18].

Limb, Rubinstein y Walsh [19] realizan varias pruebas de cuantificación de Y, I, Q, encontrando como aceptables las diferenciales a 12, 6 y 4 niveles, y empleando técnicas de interpolación para la reducción del régimen binario. Proponen también para el mismo fin el envío de una versión comprimida en tiempo de las señales de crominancia en los intervalos de borrado de línea.

Un método adaptativo para la señal de color es la *codificación de meseta*: consistente en una clasificación en regiones de cromaticidad aproximadamente constante (cuyo valor medio se envía), y delimitación de bordes por variación de pendientes. Netravali y Rubinstein [9], [11] proponen también clasificaciones según funciones de visibilidad dependientes de la pendiente de luminancia o de las pendientes de las componentes de crominancia; recurriendo a ellas para cuantificaciones «subjetivas» (véase el apartado anterior) de las componentes por separado.

EFFECTOS DE LOS ERRORES DEL CANAL

En los sistemas D.P.C.M. con predicción por elemento previo y en los D.M. con integración perfecta, los errores en los bits transmitidos por acción del ruido presente en el canal de comunicación tienden a mantenerse permanentemente en la señal reconstruida; manifestándose como «rayas» (que desaparecen entre líneas) en la imagen recibida. El efecto subjetivo no se tolera para tasas de error medianamente altas (figura 15).

Para evitar el rayado, se utilizan predictores e integración con «pérdida», de modo que las rayas se atenúan en pocos elementos de imagen. Los predictores bidimensionales en espacio dan también formas más tolerables a los efectos del error en la imagen; lo mismo ocurre con la «predicción 2D» (predictor auxiliar) en el caso de D.M.

La acumulación de errores se combate también con diversos procedimientos; el más sencillo, una conmutación periódica a P.C.M.

Los métodos adaptativos se hacen mucho más sensibles al error que los fijos; dado que los bits alterados en la transmisión modifican también la reconstrucción del algoritmo de adaptación en el receptor, aumentando la importancia de los errores.

En general, pese a que el tema de los errores de canal no ha sido, ni con mucho, exhaustivamente estudiado, puede decirse que las técnicas diferenciales presentan los errores de formas subjetivamente menos tolerables que las de transformación. En ello radica una de las especiales ventajas de los procedimientos híbridos, que simultanean cierta simplicidad de constitución con una «ocultación» de los errores semejante a las técnicas de transformación.

CONCLUSION

Las técnicas diferenciales (D.P.C.M. y D.M.), junto con sus variantes adaptativas y realizaciones «subjetivas», además de los métodos de reducción e intercambios de resoluciones, se han presentado de modo que quede manifiesta su simplicidad frente a las transformaciones. Los procesos de clasificación, que mejoran sensiblemente la calidad, han sido considerados también, así como las técnicas duales, encaminadas fundamentalmente a la reducción del ancho de banda, y las híbridas, para un balanceo sencillez-calidad.

Se ha destinado un Apartado a una breve revisión de opciones para la digitización de señal de color, y otro a la consideración de efectos de errores de canal.

Los procedimientos diferenciales o derivados serán, muy probablemente, los que ocupen las aplicaciones de comunicación comercial de señal de video, al menos en los próximos años. ●

REFERENCIAS

- [1] A.H. Frei, H.R. Schlinder, P. Vettiger: An Adaptive Dual Coder/Decoder for Television Signals. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-19, pp. 933-944; Dec. 1971.
- [2] H.H. Bauch, H. Häberle, H.G. Musmann, H. Ohnsorge, G.A. Wengeroth, H.J. Woite: Picture Coding. I.E.E.E. Trans on Communications, vol. COM-22, pp. 1158-1167; Sept. 1974.
- [3] A. Habibi: Comparison of Nth-Order D.P.C.M. Encoder with Linear Transformation and Block Quantization Techniques. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-19, pp. 948-956; Dec. 1971.
- [4] H.G. Musmann: A Comparison of Extended Differential Coding Schemes for Video Signals. Proc. I.E.E.E. Zürich Seminar on Digital Comms., pp. C1 (1)–C1 (7); 1974.
- [5] B.S. Atal, M.R. Schroeder: Adaptive Predictive Coding of Speech Signals. Bell System Techn. Journ., vol. 49, pp. 1968-1973; 1970.
- [6] E.N. Protonotarios, C.A. Mourikis: Differential P.C.M. with a Kalman Filter Predictor. Proc. Eurocon'77, pp. 310-315; Venezia, 1977.
- [7] J.O. Limb, C.B. Rubinstein, J.E. Thompson: Digital Coding of Color Video Signal-A Review. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-25, pp. 1349-1385; Nov. 1977.
- [8] J.E. Thompson: Differential Encoding of Composite Color Television Signals Using Chrominance - Corrected Prediction. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-22, pp. 1106-1113; Aug. 1974.
- [9] A.N. Netravali, C.B. Rubinstein: Quantization of Color Signals Based on Subjective Criteria. I.E.E.E. Intl. Conf. on Comms. Record, pp. (23-12) - (23-16); 1975.
- [10] A.N. Netravali, B. Prasada: Adaptive Quantization of Picture Signals Using Spatial Masking. Proc. I.E.E.E., vol. 65, pp. 536-548; Apr. 1977.
- [11] A.N. Netravali, C.B. Rubinstein: Quantization of Color Signals. Proc. I.E.E.E., vol. 65, pp. 1177-1187; Aug. 1977.
- [12] D.K. Sharma, A.N. Netravali: Design of Quantizers for D.P.C.M. Coding of Picture Signals. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-25, pp. 1267-1274; Nov. 1977.
- [13] W. Thoma: Optimizing the D.P.C.M. for Video Signals Using a Model of the Human Visual System. Proc. I.E.E.E. Zürich Seminar on Digital Comms., pp. C3(1)-C3(7); 1974.
- [14] F. Kretz: Subjectively Optimal Quantization of Pictures. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-23, pp. 1288-1292; Nov. 1975.
- [15] D.J. Connor, R.F.W. Pease, W.G. Scholes: TV-Coding Using Two-Dimensional Spatial Prediction. Bell System Techn. Journ., vol. 50, pp. 1049-1061; 1971.
- [16] D.J. Connor, R.C. Brainard, J.O. Limb: Intraframe Coding for Picture Transmission. Proc. I.E.E.E., vol. 60, pp. 779-791; July 1972.
- [17] B.G. Haskell, F.W. Mounts, J.C. Candy: Interframe Coding of Videotelephone Pictures. Proc. I.E.E.E., vol. 60, pp. 792-800; July 1972.
- [18] A. Habibi, G.S. Robinson: A Survey of Digital Picture Coding. Computer Mag. of the I.E.E.E., pp. 22-34; May 1974.
- [19] J.O. Limb, C.B. Rubinstein, K.A. Walsh: Digital Coding of Color Picturephone Signals by Element-Differential Quantization. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-19, pp. 992-1005; Dec. 1972.
- [20] K. Virupaksha, J.B. O'Neil, Jr.: Entropy-Coded Adaptive Differential Pulse Code Modulation (D.P.C.M.) for Speech. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-22, pp. 777-787; June 1974.
- [21] M.R. Winkler: High Information Delta Modulation. I.E.E.E. Intl. Conv. Record. Pt. 8, pp. 260-265; 1963.
- [22] J.E. Abate: Linear and Adaptive Delta Modulation. Proc. I.E.E.E., vol. 55, pp. 298-308; March 1967.
- [23] R.H. Bosworth, J.C. Candy: A Campanded One-Bit Coder for Television Transmission. Bell Systems Techn. Journ., vol. 48, pp. 1459-1479; May-June 1969.
- [24] N.S. Jayant: On the Delta Modulation of a First-Order Gauss-Markov Signal. I.E.E.E. Trans on Communications, vol. COM-26, pp. 150-156; Jan. 1978.
- [25] S. Tazaki, H. Osawa, Y. Shigematsu: A Useful Analytical Method for Discrete Adaptive Delta Modulation. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-25, pp. 193-199; Febr. 1977.
- [26] T.-L.R. Lei, N. Scheinberg, D.L. Schilling: Adaptive Delta Modulation Systems for Video Encoding. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-25, pp. 1302-1314; Nov. 1977.
- [27] C.C. Cutler: Delayed Encoding: Stabilizer for Adaptive Coders. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-19, pp. 898-907; Dec. 1971.
- [28] V.G. Devereux: Digital Video: Differential Coding of PAL Signals Based on Differences Between Samples One Subcarrier Period Apart. BBC Report, 1973/7; June 1973.
- [29] A. Habibi: Hybrid Coding of Pictorial Data. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-22, pp. 614-624; May 1974.
- [30] A. Habibi, W.K. Pratt, G. Robinson, R. Means, H. Whitehouse, J. Speiser: Real Time Image Redundancy Reduction Using Transform Coding Techniques. I.E.E.E. Intl. Conf. on Comms. Record, pp. 18A (1)–18A(8); 1974.
- [31] K.R. Rao, M.A. Narasimhan, W.J. Gorzinski: Processing Image Data by Hybrid Techniques. I.E.E.E. Trans. on Sys., Man and Cybernetics, vol. SMC-7, pp. 728-734; Oct. 1977.
- [32] W. Thoma: Video Transmission Network with Intraframe D.P.C.M. and Optional Interframe Coding. I.E.E.E. Intl. Conf. on Comms. Record, pp. (39-1)–(39-6); 1972.
- [33] B.G. Haskell, P.L. Gordon, R.L. Schmidt, J.V. Scattaglia: Interframe Coding of 525-Line, Monochrome Television at 1.5 Mb/s... I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-25, pp. 1339-1348; Nov. 1977.
- [34] F.W. Mounts: Video Encoding System with Conditional Picture-Element Replenishment. Bell System Techn. Journ., vol. 46, pp. 261-271; 1967.
- [35] W.F. Schreiber, T.S. Huang, O.J. Tretiak: Contour Coding of Images. I.R.E. Western Electron Show and Conv. Conf. Record., pp. 8/3 (1)-8/3(6); 1968.
- [36] D.N. Graham: Image Transmission by Two-Dimensional Contour Coding. Proc. I.E.E.E., vol. 55, pp. 336-346, Mar. 1967.
- [37] J.O. Limb: Adaptive Encoding of Picture Signals. Proc. Symp. Picture Bandwidth Compression. pp. 341-382; M.I.T., Cambridge, Mass., 1969.
- [38] L.C. Wilkins, P.A. Wintz: A Contour Tracing Algorithm for Data Compression for Two-Dimensional Data. Techn. Rep. TR-EE69-3, Purdue Univ. School of Engng., Lafayette, Ind.; 1969.
- [39] M. Tasto, P.A. Wintz: Image Coding by Adaptive Block Quantization. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-19, pp. 957-972; Dec. 1971.
- [40] W. Zschunke: D.P.C.M. Picture Coding with Adaptive Prediction. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-25, pp. 1295-1302; Nov. 1977.
- [41] A. Habibi: Survey of Adaptive Image Coding Techniques. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-25, pp. 1275-1284; Nov. 1977.
- [42] J.K. Yan, D.J. Sakrison: Encoding of Images Based on a Two-Component Source Model. I.E.E.E. Trans. on Communications, vol. COM-25, pp. 1315-1322; Nov. 1977.

Nota: El curriculum profesional de los autores ha sido publicado anteriormente en los números de revista, 78 y 80.