



UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

UIT-T

SECTOR DE NORMALIZACIÓN
DE LAS TELECOMUNICACIONES
DE LA UIT

X.141

**REDES PÚBLICAS DE DATOS
ASPECTOS DE REDES**

**PRINCIPIOS GENERALES DE LA DETECCIÓN
Y CORRECCIÓN DE ERRORES EN LAS
REDES PÚBLICAS DE DATOS**

Recomendación UIT-T X.141

(Extracto del *Libro Azul*)

NOTAS

1 La Recomendación UIT-T X.141 se publicó en el fascículo VIII.3 del Libro Azul. Este fichero es un extracto del Libro Azul. Aunque la presentación y disposición del texto son ligeramente diferentes de la versión del Libro Azul, el contenido del fichero es idéntico a la citada versión y los derechos de autor siguen siendo los mismos (Véase a continuación).

2 Por razones de concisión, el término «Administración» se utiliza en la presente Recomendación para designar a una administración de telecomunicaciones y a una empresa de explotación reconocida.

© UIT 1988, 1993

Reservados todos los derechos. No podrá reproducirse o utilizarse la presente Recomendación ni parte de la misma de cualquier forma ni por cualquier procedimiento, electrónico o mecánico, comprendidas la fotocopia y la grabación en micropelícula, sin autorización escrita de la UIT.

Recomendación X.141

PRINCIPIOS GENERALES DE LA DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ERRORES EN LAS REDES PÚBLICAS DE DATOS

(Málaga-Torremolinos, 1984)

El CCITT,

considerando

- a) que los errores deben detectarse y corregirse con un grado de fiabilidad muy alto;
- b) que algunos procedimientos de corrección de errores pueden ser más ventajosos que otros según los retardos de transmisión en la red y la distribución (en el tiempo) de los errores;
- c) que la distribución (en el tiempo) de los errores en los extremos de un trayecto puede depender de los procedimientos de corrección de errores sin canal de retorno implantados en uno o más de los segmentos del trayecto;
- d) que la aplicabilidad de algunos procedimientos de corrección de errores puede verse afectada por el número de sistemas de satélite de la conexión;
- e) que en algunas conexiones pueden concatenarse diferentes procedimientos de corrección de errores,

recomienda por unanimidad

que los principios generales identificados en esta Recomendación se tengan en cuenta en el diseño y aplicación de procedimientos para la detección y corrección de errores en las redes públicas de datos.

1 Consideraciones generales

1.1 La presente Recomendación tiene por finalidad describir los principios generales aplicables a la detección y corrección de errores o recuperación tras errores de transmisión en enlaces de redes públicas de datos.

1.2 Los dos objetivos fundamentales de los procedimientos de control de errores son:

- garantizar una incidencia de errores no detectados que se halle dentro de límites de probabilidad aceptablemente bajos;
- garantizar que los errores detectados son corregidos o recuperados utilizando un procedimiento de control de errores coherente con los requisitos de secuenciación e integridad de datos que se aplican cuando la tasa de errores de la capa física está dentro de límites de la calidad de funcionamiento especificada totalmente aceptables y tolerables.

1.3 En el contexto del modelo de referencia de la interconexión de sistemas abiertos (ISA), se señala en la Recomendación X.200 que cada protocolo entre pares (N) debe comprender suficiente información de control para permitir a las entidades (N) que detecten o recuperen las condiciones de error que se presenten dentro de su alcance. La notificación de los errores detectados pero no recuperados es un servicio que debe proporcionar cada capa.

Concretamente, un objetivo de la capa enlace de datos consiste en detectar y en corregir en lo posible los errores que puedan producirse en la capa física.

1.4 En el caso de cualquier disposición dada de detección de errores, la probabilidad de aparición de errores no detectados tenderá a aumentar en general:

- con el incremento de la tasa de errores;
- para una determinada tasa de errores, a medida que la distribución de errores resulta menos aleatoria y aumenta la longitud de las ráfagas de errores;

- con el incremento de la longitud de trama;
- posiblemente con las disposiciones de aleatorización que pueden tener factores comunes con el polinomio generador utilizado para la detección de errores.

1.5 El caudal de datos en presencia de errores depende del diseño del procedimiento de control de errores, que depende a su vez de las siguientes condiciones:

- tasa de errores;
- distribución de errores;
- disposiciones de aleatorización y/o multiplexación en la medida en que afecten a la distribución de errores o a la tasa de errores;
- retardo en el trayecto de transmisión (tiempo de propagación);
- velocidad binaria;
- longitud de trama;
- tamaño de la ventana;
- recursos de memoria intermedia en los extremos de envío y de recepción del enlace.

2 Tipos de aparición de errores

Los tipos de aparición de errores son habitualmente tres, que se diferencian por la distribución característica de los errores en función del tiempo:

- errores aleatorios,
- errores en ráfagas,
- errores debidos a un deslizamiento incontrolado.

Es probable que en un enlace determinado predomine un tipo de aparición de errores, que depende de la clase de sistema de transmisión empleada (por ejemplo, cable, radioenlace de microondas o satélite, con o sin corrección de errores sin canal de retorno).

En el diseño de los procedimientos de control de errores en un enlace, importa identificar cualquier tendencia al predominio de un tipo determinado de aparición de errores.

3 Procedimientos de control de errores (o de protección contra errores)

3.1 Tipos de procedimientos

En las redes públicas de datos (RPD) se utilizan corrientemente dos tipos de control de errores:

- corrección de errores sin canal de retorno, método de codificación que tiene por objeto detectar y corregir los errores en los datos recibidos en lugar de pedir la retransmisión;
- procedimientos de petición automática de repetición (ARQ), en los que la información transmitida tiene un formato de tramas con codificación para la detección de errores, y en los que la recuperación tras error se logra por la repetición automática, previa petición del receptor de los datos, de una trama o de toda la información ya transmitida a partir de la trama pedida. La recuperación por temporizador sirve de respaldo al procedimiento ARQ.

3.2 Corrección de errores sin canal de retorno

La corrección de errores sin canal de retorno (denominada también corrección intrínseca de errores o corrección de errores hacia adelante) (*forward error correction, FEC*) no requiere la provisión de un mecanismo de devolución para su funcionamiento. La FEC se aplica habitualmente en la capa física del modelo de referencia, típicamente en sistemas de transmisión con una calidad de funcionamiento ante los errores que no satisfaría de otro modo los límites requeridos.

La capacidad de las técnicas FEC, utilizadas corrientemente en RPD, para controlar los errores tiende a restringirse a la corrección de un número limitado de errores (típicamente dos o tres errores) dentro de cada bloque de información codificada o longitud de bloque limitada. Por ese motivo, estos procedimientos FEC tienen especial eficacia en las situaciones en las que los errores aparecen predominantemente en forma aleatoria.

Según las disposiciones de multiplexación, y a veces en otras disposiciones de la capa física como la aleatorización y la encriptación, los errores residuales no corregidos después de la FEC pueden tender a agruparse en racimos o ráfagas de errores. Cuando el número de errores dentro de una trama de información codificada o de una longitud de código limitada excede a la capacidad de corrección del algoritmo FEC, el número total de errores presentes en el racimo o la ráfaga puede aumentar en lugar de disminuir por la acción de la facilidad FEC.

Habitualmente no se podrán notificar los errores detectados, pero no corregidos, a la capa enlace de datos a través de las facilidades FEC de la capa física, que puede realizar su propia función de control de errores en el nivel de la señal multicanal, multiplexada, del sistema de transmisión.

En la adaptación de las señales de datos a velocidades binarias recomendadas inferiores a 64 kbit/s para la transmisión a 64 kbit/s, se introducirá suficiente redundancia en algunos casos para que la corrección de errores sin canal de retorno se haga sobre una base de votación mayoritaria, sin codificación especial para la corrección de errores sin canal de retorno. Esta disposición permite detectar y corregir un elevado número de distintos tipos de errores.

En forma alternativa, o adicional, la secuencia de verificación de trama del procedimiento de control de errores ARQ puede utilizarse también para distinguir la información recibida correcta e incorrectamente en los trenes de señales redundantes.

3.3 Procedimientos ARQ

3.3.1 Consideraciones generales

Los procedimientos ARQ requieren la provisión de canales hacia adelante y hacia atrás, habitualmente con posibilidades de transmisión simultánea.

Los procedimientos de control ARQ para detección de errores y recuperación tras error se incluyen en las funciones de la capa enlace de datos y pueden realizarse también en las funciones de capas superiores del modelo de referencia.

3.3.2 Detección de errores

3.3.2.1 Secuencia de verificación de trama

La secuencia de verificación de trama (SVT), de 16 bits descrita más adelante se utiliza para la detección de errores en los procedimientos de transferencia de paquetes de las Recomendaciones X.25 y X.75, en el procedimiento del enlace de señalización del sistema de señalización N^o 7 de la Recomendación Q.703, y en el procedimiento de acceso al enlace por canal D de una RSDI, como se describe en la Recomendación Q.921 (I.441).

También se utiliza el mismo polinomio generador en el proceso de codificación y verificación de la Recomendación V.41.

Los 16 bits de la SVT se generan en el transmisor. Son el complemento a uno de la suma (en módulo 2) de:

- 1) el resto de $x^h (x^{15} + x^{14} + x^{13} + \dots + x^2 + x + 1)$ dividido (en módulo 2) por el polinomio generador $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ donde h es el número de bits de la trama entre, pero no incluidos, el último bit de la bandera de apertura y el primer bit de la SVT, excluidos los bits insertados para asegurar la transparencia, y
- 2) el resto después de la multiplicación por x^{16} seguida de la división (en módulo 2) por el polinomio $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ del contenido de la trama entre, pero no incluidos, el último bit de la bandera de apertura y el primer bit de la SVT; excluidos los bits insertados para asegurar la transparencia.

En un caso práctico típico, en el transmisor, el resto inicial de la división se pone a “todos uno” y se modifica luego dividiéndolo por el polinomio generador (como se ha descrito anteriormente) en los campos de dirección, control e información; el complemento a uno del resto resultante se transmite como la SVT de 16 bits.

En el receptor se comprueba la correspondencia entre los bits de verificación y la parte restante de la trama. Si no se halla una correspondencia completa, se inicia el procedimiento apropiado de recuperación tras error.

En un caso práctico típico, en los receptores, el resto inicial se pone previamente a “todos uno”; los bits serie protegidos entrantes, incluidos los bits de verificación (después de eliminar los bits insertados para asegurar la transparencia), multiplicados por x^{16} y divididos luego por el polinomio generador darán lugar a un resto de 0001110100001111 (x^{15} a x^0 , respectivamente), en ausencia de errores de transmisión.

En el apéndice I figuran notas explicativas acerca del procedimiento de detección de errores por la secuencia de verificación de trama.

El procedimiento detectará:

- a) todos los números impares de errores dentro de una trama;
- b) cualquier ráfaga de errores que no exceda de una longitud de 16 bits;
- e) todos los errores de dos bits cuando la longitud del código sea inferior a 32 768 bits;
- d) un elevado porcentaje de otros esquemas de errores (con números pares de errores).

3.3.2.2 Utilización de aleatorizadores

Debe tenerse en cuenta la siguiente consideración, relativa al diseño del sistema, en lo que respecta al uso de aleatorizadores autosincronizantes:

Cuando se utilicen aleatorizadores autosincronizantes (esto es, aleatorizadores que dividen efectivamente el polinomio de mensaje por el polinomio del aleatorizador en el transmisor y multiplican el polinomio recibido por el polinomio del aleatorizador en el receptor), el polinomio del aleatorizador y el polinomio generador para la detección de errores no deberán tener factores comunes a fin de asegurar una calidad satisfactoria del sistema de detección de errores. Si no se puede mantener esa condición, el proceso de aleatorización debe preceder al proceso de codificación para la detección de errores y el proceso de desaleatorización debe seguir al proceso de decodificación para la detección de errores. Si se emplean aleatorizadores aditivos (esto es, no autosincronizantes) o si la aleatorización se efectúa en el nivel de la señal multicanal multiplexada, entonces no necesita observarse esa precaución de diseño.

3.3.2.3 Integridad de la trama

La integridad del formato de trama debe mantenerse a fin de asegurar un correcto funcionamiento del procedimiento de detección de errores descrito en § 3.3.2.1.

Para todas las transmisiones, la estructura de trama se diferencia por las banderas de apertura y cierre, consistente cada una en 0 seguido de seis unos contiguos y un 0. Puede utilizarse una sola bandera como bandera de cierre de una trama y bandera de apertura de la trama siguiente. Para tener la seguridad de que no se simula la secuencia única de bandera, se examina el contenido entero de la trama comprendida entre dos secuencias de bandera en el transmisor y se inserta un bit 0 después de todas las secuencias de cinco bits unos consecutivos (incluidos los últimos cinco bits de la SVT). En el receptor se reexamina el contenido de la trama y se elimina cualquier bit 0 que sigue directamente a cinco bits unos consecutivos.

En el receptor se efectúa una verificación de la validez de la trama para descubrir cualquier trama no válida que no está encuadrada convenientemente por dos banderas o que tiene un número de bits inferior al especificado. Las tramas no válidas se tratan del mismo modo que las tramas con errores detectados.

3.3.3 Procedimiento de recuperación tras error

De acuerdo con los conceptos ARQ, la recuperación tras error está incorporada al procedimiento de control del tráfico de modo que todas las tramas de información están numeradas secuencialmente por orden de transmisión, de 0 al módulo menos uno (en donde “módulo” es el módulo de los números secuenciales). En un caso típico, el módulo es igual a 8 ó 128 y el ciclo de números secuenciales pasa por toda la gama.

Las tramas válidas recibidas sin errores en una secuencia correcta van seguidas de un acuse de recibo incluido en las respuestas enviadas por el receptor al transmisor, mientras que las tramas no válidas y las tramas con errores son eliminadas por el receptor e ignoradas totalmente. El receptor inicia la acción de recuperación de trama cuando una trama válida sin errores no tiene el número secuencial previsto. Por consiguiente, cuando se eliminan una o más tramas por falta de validez o por errores, el número de la siguiente trama recibida correctamente será el número secuencial que haga que el receptor inicie el procedimiento prescrito de *recuperación de trama*.

Si, debido a un error de transmisión, el receptor no recibe (o recibe y elimina) una sola trama de información o la última de una secuencia de tramas de información, entonces no se detectará la condición “fuera de secuencia” que en otro caso serviría para iniciar en el receptor los procedimientos de recuperación tras error. En tal caso, la recuperación de la trama se iniciará en el transmisor por un procedimiento de temporización del siguiente modo:

Para los fines de control del tráfico, el receptor debe enviar una respuesta de acuse de recibo al transmisor confirmando la recepción de tramas válidas y exentas de errores. Después de un periodo de temporización determinado, con tramas transmitidas pendientes y ninguna respuesta de acuse de recibo o de recuperación de trama procedente del receptor, se inicia la acción de recuperación apropiada en el transmisor a fin de determinar el punto en el que debe empezar la retransmisión.

Se dispone de los siguientes tipos de procedimientos de recuperación tras errores:

- procedimiento de rechazo,
- procedimiento de rechazo selectivo,
- procedimiento de rechazo selectivo – rechazo.

Cada uno de esos procedimientos requiere que en el transmisor existan posibilidades de almacenamiento de todas las tramas de información ya enviadas, pero de las que no se ha acusado recibo de una recepción correcta.

La eficiencia del caudal de datos obtenible, en función de la tasa y distribución de errores, puede depender de modo significativo del tipo de procedimiento de recuperación tras error, en particular en los enlaces de transmisión asociados con tiempos de propagación largos (por ejemplo, enlaces por satélite). La complejidad de la realización de la recuperación tras error, en particular los requisitos de almacenamiento de tramas en el receptor, es otra consideración que desempeña una función importante al seleccionar el procedimiento de recuperación tras error más ventajoso en una situación dada.

3.3.3.1 Procedimiento de rechazo (REJ)

El receptor utiliza el procedimiento de recuperación tras error por rechazo (REJ) para pedir la retransmisión de tramas de información a partir de un número secuencial especificado y para acusar recibo simultáneamente de la recepción satisfactoria de todas las tramas de información precedentes.

Se retransmitirán la trama rechazada y todas las tramas de información subsiguientes y en tránsito en el momento en que la respuesta REJ llega al transmisor.

Después de enviar la respuesta REJ, el receptor descarta todas las tramas de información entrantes hasta la recuperación de la trama perdida. Este procedimiento reduce al mínimo los requisitos de almacenamiento de tramas en el receptor, pero en condiciones marginales de calidad de funcionamiento frente a errores puede dar una mala eficiencia de caudal, dependiente del retardo de transmisión de ida y vuelta entre el transmisor y el receptor.

En el procedimiento de recuperación tras error REJ, el tamaño de la ventana debe permitir un número máximo k de tramas pendientes, siendo k el menor número entero no inferior a r , calculado del siguiente modo:

$$r = \frac{T \cdot D}{L}$$

donde

T es la velocidad de transmisión (bits/s),

D es el tiempo de ida y vuelta (s),

L es la longitud de la trama de información (bits).

3.3.3.2 Procedimiento de rechazo selectivo

La respuesta de *rechazo selectivo* (SREJ) la utiliza el receptor para pedir la retransmisión de una sola trama de información identificada por su número secuencial y para acusar recibo simultáneamente de la recepción satisfactoria de todas las tramas de información precedentes.

Conforme a la precedente definición de la petición de SREJ, sólo puede hallarse pendiente una condición SREJ en un momento dado. Por consiguiente, la capacidad del procedimiento SREJ para utilizar eficazmente la capa física descende muy rápidamente a medida que la aparición de errores de trama excede al tiempo de propagación de ida y vuelta.

Ese problema puede reducirse empleando un procedimiento alternativo SREJ que suprime la función de acuse de recibo de la petición de SREJ y que, por consiguiente, permite a una estación enviar una segunda petición SREJ para la retransmisión de otra trama de información defectuosa antes de que se haya recibido correctamente la trama de información en respuesta a la primera petición de SREJ. Este procedimiento alternativo puede ser especialmente útil en el caso de la transmisión a gran velocidad por satélite.

Conforme al procedimiento alternativo, la trama de rechazo selectivo SREJ se utiliza para pedir la retransmisión de una sola trama de información numerada $N(R)$ y las tramas de información numeradas hasta $N(R) - 1$ no se consideran aceptadas.

No se repetirán (si se reciben correctamente) las tramas de información subsiguientes que están ya en tránsito cuando la respuesta SREJ llega al transmisor. Se produce así una reducción mínima de la eficiencia del caudal, que depende del aumento de la tasa de errores en trayectos de transmisión con grandes tiempos de propagación.

Esa ventaja del procedimiento SREJ se obtiene proporcionando una considerable capacidad de almacenamiento de tramas y algún procedimiento de proceso para la reselección de las tramas en el receptor.

En el procedimiento de recuperación SREJ, el tamaño de la ventana debe permitir un número máximo, k , de tramas pendientes, siendo k un número entero no inferior a r , calculado del siguiente modo:

$$r = 2 \frac{T \cdot D}{L}$$

3.3.3.3 Procedimiento de rechazo selectivo – rechazo

Se propone a continuación un procedimiento de rechazo selectivo – rechazo:

Si el receptor detecta la pérdida de una sola trama de información, tras la recepción satisfactoria de la siguiente trama de información, envía una respuesta SREJ para recuperar la trama perdida. Todas las tramas de información recibidas satisfactoriamente en forma secuencial después de la trama perdida se almacenan en el receptor durante la recuperación de la trama perdida.

Si el receptor detecta la pérdida consecutiva de dos tramas de información, envía una respuesta REJ y elimina todas las tramas de información recibidas a continuación hasta recuperar la trama perdida.

Si la pérdida de otra trama de información se detecta antes de la recuperación a partir de la condición de excepción SREJ, el receptor almacenará todas las tramas de información recibidas después de la primera trama perdida y antes de la segunda trama perdida y eliminará todas las tramas de información consecutivas hasta recuperar la primera trama perdida. Después de la recuperación de la primera trama perdida, el receptor enviará una respuesta REJ para recuperar la segunda trama perdida y las tramas recibidas después pero eliminadas.

Aplicado en trayectos de transmisión con grandes retardos, el procedimiento de recuperación tras error SREJ-REJ da valores de eficiencia de caudal, en función de la tasa de errores, ligeramente inferiores a los obtenidos con el procedimiento SREJ y significativamente mejores a los logrados con el procedimiento REJ.

Con cualquier tasa de errores, la ocupación media de la memoria intermedia para el almacenamiento de tramas en el receptor utilizando el procedimiento SREJ-REJ es significativamente inferior a la correspondiente ocupación media de esa memoria con el procedimiento REJ.

En el caso del procedimiento de recuperación tras error SREJ-REJ, el tamaño de la ventana debe permitir un número máximo de tramas pendientes, k , en donde k es el menor número entero no inferior a r , calculado del siguiente modo:

$$r = 2 \frac{T \cdot D}{L}$$

4 Concatenación de procedimientos de control de errores

4.1 Concatenación de procedimientos FEC y ARQ

En los enlaces por satélite, la reducción del caudal de datos provocada por el aumento de la tasa de errores puede reducirse al mínimo mediante el empleo concatenado de los procedimientos de corrección de errores sin canal de retorno (FEC) y de petición automática de repetición (ARQ).

Teniendo en cuenta que la corrección de errores sin canal de retorno disminuye el caudal efectivo de datos del medio de transmisión en condiciones de explotación aceptables cuando la tasa de errores es baja y alcanza la mayor eficacia sólo durante un pequeño porcentaje del tiempo cuando la calidad respecto a errores es marginal, puede considerarse que el empleo de un procedimiento ARQ más eficaz (por ejemplo, el SREJ en lugar del REJ) es una alternativa a la concatenación de procedimientos FEC y ARQ.

4.2 Concatenación de procedimientos FEC

La utilización de dos etapas de codificación de corrección de errores sin canal de retorno (FEC) puede mejorar muy significativamente la calidad de funcionamiento de un enlace por satélite. La figura 1/X.141 muestra la configuración general de un sistema de codificación de este tipo con concatenación de dos etapas. Este diagrama muestra dos pares de intercaladores que se estudian a continuación y que en algunos casos pueden omitirse.

Los pares de intercaladores tienen por objeto fragmentar las ráfagas de errores y dispersar dichos errores para minimizar la probabilidad de presentar a un decodificador una larga ráfaga de errores incorregibles. El par de intercaladores de símbolos de canal se puede suprimir si se sabe que los errores de canal son estadísticamente independientes. Cuando se produce un error de decodificador interno, el decodificador entregará a la salida una ráfaga de errores. Por consiguiente, es necesario incluir un par de intercaladores de intercódigo que tiene por objeto transformar las ráfagas de errores de decodificador interno ocasionales de modo que puedan ser eficazmente corregidas por el decodificador externo. De ahí que un sistema de codificación concatenado bien diseñado incluya códigos e intercaladores diseñados de forma que se completen mutuamente. El código interno debe corregir casi todos los errores de canal y el código externo debe corregir los errores residuales causados por los fallos y errores del decodificador interno.

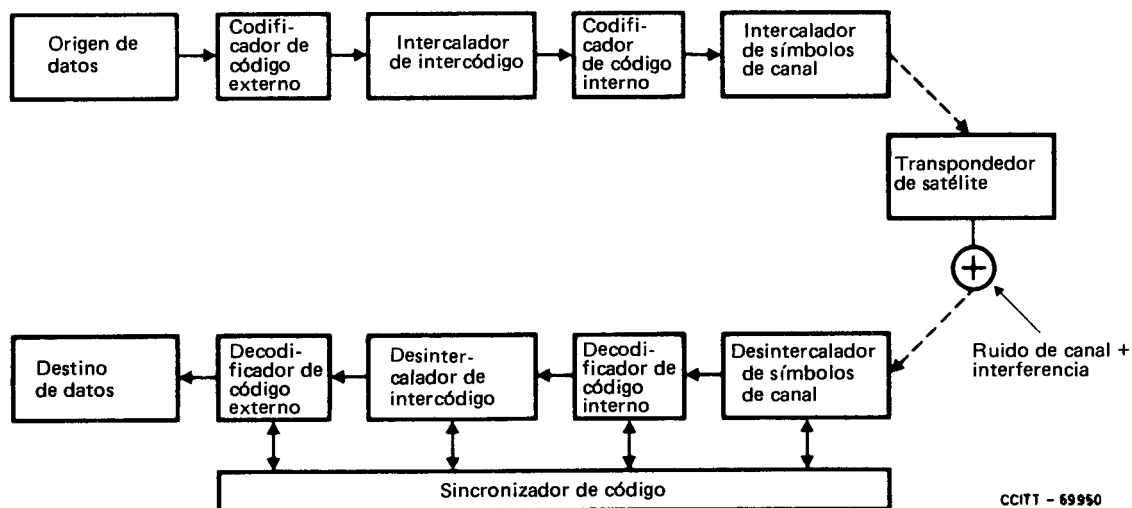


FIGURA 1/X.141

Configuración FEC con concatenación de dos etapas

Una última consideración en relación con la selección de un código concatenado es la relativa al retardo y sincronización de la decodificación. Se pondrá especial empeño en seleccionar los códigos e intercaladores para asegurar que:

- 1) el retardo introducido por el sistema FEC sea pequeño con respecto al tiempo de propagación del satélite (aproximadamente 250 ms), y
- 2) se reduzca al mínimo la pérdida de datos motivada por la pérdida de la sincronización.

APÉNDICE I
(Recomendación X.141)

Notas explicativas relativas a la secuencia de verificación de trama

En las notas explicativas dadas a continuación se utilizan las siguientes abreviaturas:

- $G(x)$ es el polinomio que representa la secuencia de k bits comprendida entre la bandera de apertura y el comienzo de la secuencia de verificación de trama (SVT)
- $P(x)$ es el polinomio generador ($x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$)
- $L(x)$ es el polinomio que representa dieciséis ($x^{16} + x^{15} + x^{14} + \dots + x + 1$) contiguos
- $R(x) = \overline{SVT}$ es el resto obtenido de la división en módulo 2:

$$\frac{x^{16} G(x) + x^k L(x)}{P(x)} = Q(x) + \frac{R(x)}{P(x)}$$

En la secuencia de verificación de trama (SVT), la multiplicación de $G(x)$ por x^{16} corresponde al desplazamiento del mensaje $G(x)$ en 16 posiciones, proporcionando así el espacio de 16 bits para la SVT.

La adición de $x^k L(x)$ a $x^{16} G(x)$ equivale a la inversión de los 16 primeros bits de $x^{16} G(x)$ y corresponde a la iniciación del resto inicial a un valor de todos unos. Se proporciona esa adición como protección contra la obliteración de las banderas de apertura, que pueden ser no detectables si el resto inicial es nulo. La complementación de $R(x)$ por el transmisor, en la realización de la división, permite garantizar que el mensaje recibido sin errores dará un resto único no nulo en el receptor. El resto no nulo protege contra la posible indetectabilidad debida a la obliteración de las banderas de cierre.

En el transmisor, la SVT se suma a $x^{16} G(x)$ resultando un mensaje total $M(x)$ de una longitud de:

$$n = k + 16, \text{ donde } M(x) = x^{16} G(x) + SVT$$

En el receptor, el mensaje $M(x)$ entrante se multiplica por x^{16} , se suma a $x^n L(x)$ y se divide por $P(x)$ como se indica a continuación:

$$\frac{x^{16} M(x) + x^n L(x)}{P(x)} = \frac{x^{16} [x^{16} G(x) + SVT + x^k L(x)]}{P(x)}$$

Partiendo de las fórmulas anteriores y considerando que la suma sin acarreo de $L(x)$ y un polinomio $R(x)$ de la misma longitud equivale a la inversión bit por bit de $R(x)$, se sustituye $SVT = \overline{R(x)} = R(x) + L(x)$, se reordenan los términos del numerador y se obtiene:

$$\frac{x^{16} [x^{16} G(x) + R(x) + L(x) + x^k L(x)]}{P(x)} = \frac{x^{16} [x^{16} G(x) + x^k L(x) + R(x)] + x^{16} L(x)}{P(x)} = Qr(x) + \frac{Rr(x)}{P(x)}$$

Si la transmisión no tiene errores, el término $[x^{16} G(x) + x^k L(x) + R(x)]$ será divisible por $P(x)$, siendo el resto de la división:

$$\frac{x^{16} L(x)}{P(x)},$$

- o 0001110100001111 (de x^{15} a x^0 respectivamente).

Si la transmisión no tiene errores y se invierte la SVT en el receptor antes de la división, el resto será nulo, ya que la inversión de la SVT equivale a sumar otro $x^{16} L(x)$ al numerador, y

$$\frac{x^{16} L(x) + x^{16} L(x)}{P(x)} = 0.$$