



PLANIFICACIÓN DE ENLACES FDMA POR SATÉLITE

1. OBJETIVO

El objetivo de esta práctica es la planificación de un transpondedor del satélite Amazonas 3 que establecerá enlaces bidireccionales entre 4 telepuertos situados en Europa, Norteamérica y Sudamérica. El esquema de transmisión que se va a utilizar es **TDM/8-PSK/FDMA**, donde:

- ✚ TDM es el modo en el que se multiplexa la información en la portadora que transmite cada estación terrena. En general se usa TDM o FDM.
- ✚ 8-PSK es la modulación de la portadora. En general se usan modulaciones M-APSK o M-PSK
- ✚ FDMA: es la técnica de acceso al medio. En general se usan TDMA, FDMA o CDMA.

El servicio que se ofrecerá a las estaciones es un servicio de transmisión de datos a 16Mbps que debe cumplir con los objetivos de calidad de disponibilidad y fiabilidad siguientes:

- ✚ **Disponibilidad del 99,99%**
- ✚ BER admisible en **condiciones normales: 10^{-6}** , con una BER máxima admisible en condiciones extremas de 10^{-3} .

Las herramientas utilizadas serán la herramienta **bertool** de Matlab, el software **ACRIM** (Calcula la influencia de los productos de intermodulación en el enlace en función del punto de operación del satélite) y una **hoja de cálculo Excel** o un **programa de Matlab** para realizar los cálculos iterativos que nos llevan a la obtención del punto óptimo.

En la planificación de sistemas FDMA, en general, tenemos como parámetros fijos, los parámetros que caracterizan al satélite en transmisión y recepción (PIRE y G/T) y la velocidad que queremos ofrecer a cada usuario (estación terrena). Por tanto, se tratará de ajustar el número de las estaciones terrenas que van a compartir un transpondedor, así como los parámetros de transmisión y recepción de las estaciones terrenas para obtener la C/N_0 óptima.

A fin de ajustar la práctica al tiempo disponible, en este caso fijaremos también el número de estaciones y la G/T de dichas estaciones, dejando como único parámetro a ajustar la PIRE de las estaciones terrenas.

Por tanto, a partir de las características del satélite, y de los datos de las estaciones terrenas, se obtendrá la **PIRE de las estaciones** que permite trabajar en el **punto de trabajo óptimo** del satélite y se comprobará si dicho punto óptimo cumple con los **objetivos de calidad perseguidos**.



2. PLANIFICACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES POR SATÉLITE CON ACCESO FDMA

Un sistema de comunicaciones por satélite está compuesto por dos enlaces, enlace ascendente y enlace descendente, como en la Figura 1. Para realizar el balance de enlace de un sistema de comunicaciones por satélite, debe realizarse primero por separado el balance de enlace del **enlace ascendente** o de **subida (uplink)** y del **enlace descendente** o de **bajada (downlink)**.

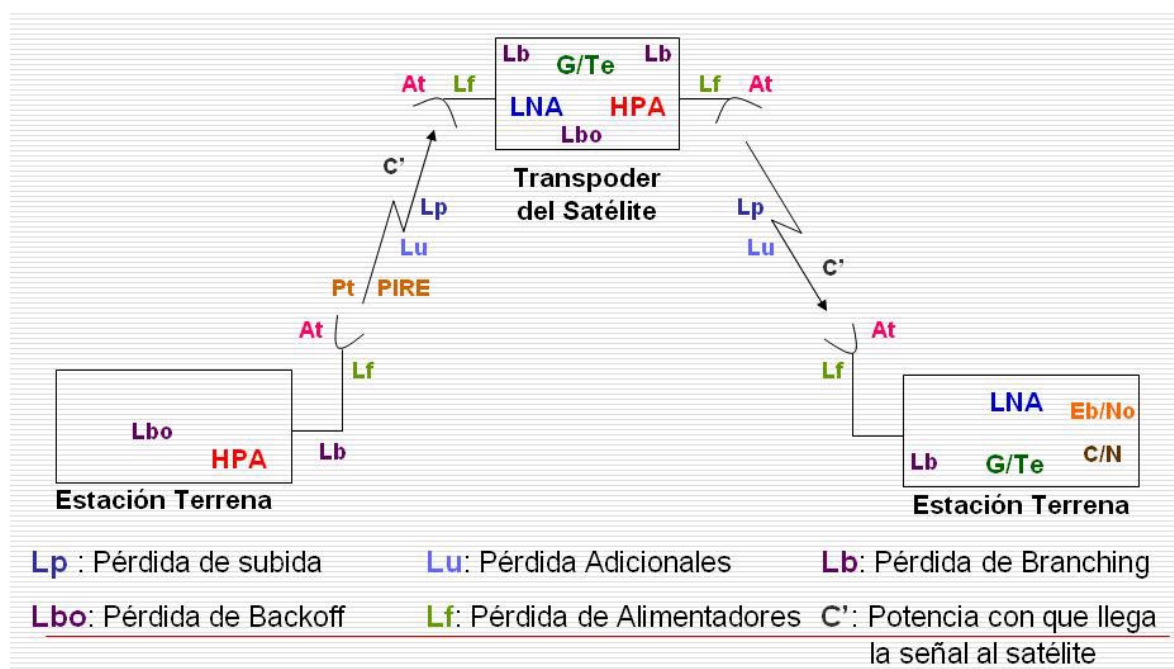


Figura 1. Balance de enlace en satélites

NOTA:

Lb (branching=ramificación): equivale a las pérdidas en los elementos de acoplo entre transmisor y antena (Ltt y Ltr en el modelo energético de un sistema radio). Tened en cuenta que, en cualquier sistema, la antena en principio es única, sin embargo, en general, puede transmitir la información procedente de varios transmisores hacia varios receptores. En el caso de los satélites, todos los transpondedores enviarán su señal a través de la misma antena, lo que hace que entre el transpondedor y la antena exista una red de acoplo (similar a las ramas de un árbol que parten de su tronco) que distribuya las señales de la antena hacia los transpondedores en recepción y haga confluir las señales de los transpondedores hacia la antena en transmisión.

David de la Mata Moya
Judith Redoli Granados



L_f (feeder=alimentador): equivale a las pérdidas de acoplo de la antena (L_{at} y L_{ar} en el modelo energético)

L_p: equivale a L_{bf}, las pérdidas en espacio libre en el enlace ascendente o descendente.

L_u: equivale a L_{ad}, pérdidas adicionales

El **transpondedor** del satélite tiene la estructura mostrada en la figura 1. Es decir, es el elemento que **convierte la frecuencia del canal ascendente** (en este caso **14GHz**) a la **frecuencia del canal descendente** (en este caso **11GHz**), y amplifica esta última señal en un amplificador de alta potencia HPA (High Power Amplifier). Hay que señalar que **14GHz** y **11GHz** se refieren a las **frecuencias centrales** que **identifican la banda de trabajo**. Esas frecuencias genéricas son las que **se usan para llevar a cabo los balances del enlace ascendente y descendente**, aunque las portadoras concretas asignadas a cada estación no estén exactamente en esa posición.

Un satélite en general contará con varios transpondedores. La planificación se lleva a cabo para cada transpondedor por separado. Los transpondedores tienen típicamente anchos de banda de 28MHz, 36MHz y 72MHz.

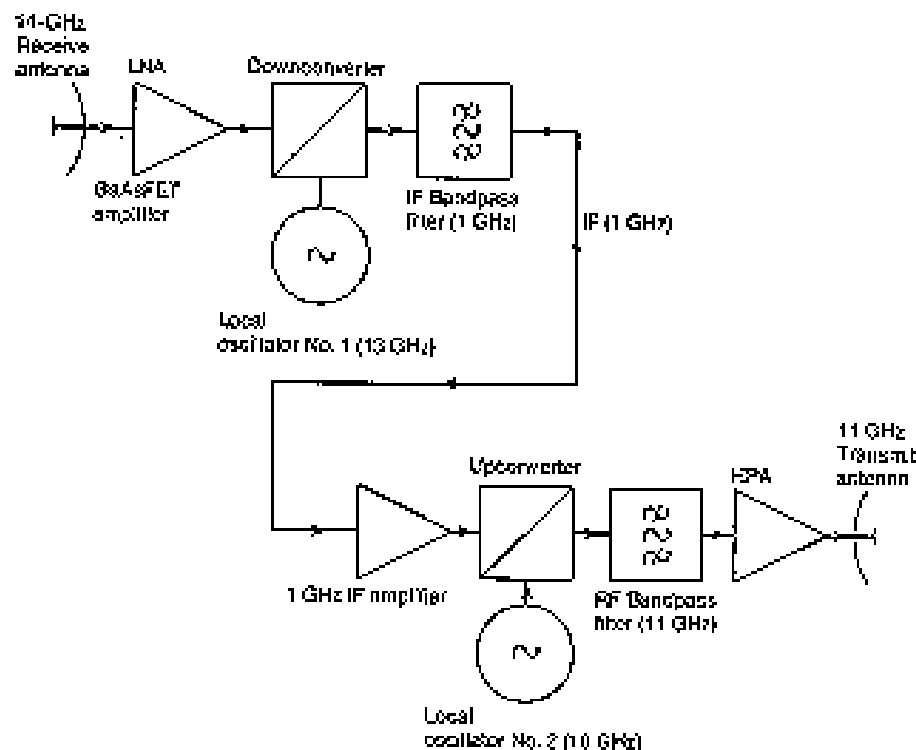


Figura 2. Diagrama de bloques de un transpondedor

En un sistema con técnica de acceso al medio **FDMA**, el transpondedor **se comparte en frecuencia**. **Cada estación terrena** tiene asignada **una sola frecuencia**, diferente del resto. Esto implica que **todas las estaciones transmitirán a la vez**, pero cada una de ellas tendrá asignada una portadora diferente con un ancho de banda concreto. Por tanto, el **ancho de banda** del transpondedor **se reparte** entre todas las portadoras.

Como el amplificador de salida del satélite (**HPA**) es un amplificador **no lineal** para poder obtener elevadas potencias a su salida, funciona muy bien en saturación si solo entra al transpondedor una sola portadora. Cuando a un amplificador no lineal entran **varias portadoras**, se producen a su salida **productos de intermodulación** (batidos de frecuencia) que generan interferencia sobre las portadoras deseadas. En el caso que nos ocupa, varias portadoras compartirán el transpondedor, por tanto, el HPA no podrá trabajar en saturación. La **cuestión clave** en un **sistema de satélite** con técnica de acceso **FDMA** es **obtener** cuál es el punto de trabajo óptimo del transpondedor, es decir, el **punto de trabajo óptimo del HPA**.

El punto de trabajo óptimo viene caracterizado por un **IBO** (input backoff) y un **OBO** (output backoff), que marcan **cuanto** hay que **alejarse** del punto de **saturación** tanto a la entrada del HPA como a la salida, tal y como refleja la figura 3. Como se puede observar, tanto el IBO como el OBO se definen como **números negativos**, y por tanto son:

IBO: la cantidad negativa que debe sumársele a la potencia de entrada de saturación del HPA para obtener la potencia de entrada de nuestro punto de trabajo.

OBO: la cantidad negativa que debe sumársele a la potencia de salida de saturación del HPA para obtener la potencia de salida de nuestro punto de trabajo.

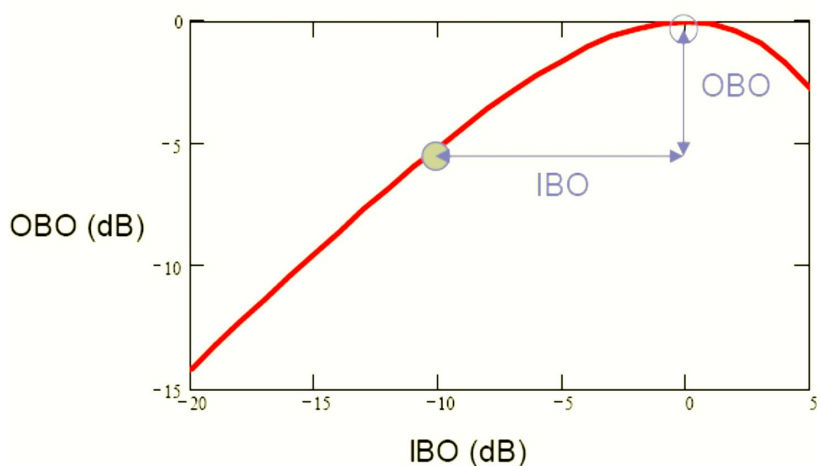


Figura 3. Respuesta no lineal de un HPA normalizada respecto a P_{in} y P_{out} de saturación y punto de trabajo

David de la Mata Moya
Judith Redoli Granados



El hecho de trabajar en un punto de trabajo determinado define una calidad de la señal a la salida del HPA. Esta calidad viene caracterizada por el parámetro C/I_0 o C/I que relaciona la potencia de portadora, con la potencia interferente debida a los productos de intermodulación generados.

Cuanto más nos **alejemos de saturación**, mayor será la **C/I_0 o C/I (C/N_{IM} en el ACRIM)**. Sin embargo, a medida que nos alejamos de saturación, menor es la potencia recibida en el satélite, y por tanto **menor** es **C/N_{0up}** , y menor es la potencia a la salida del HPA, y por tanto también **C/N_{0down} es menor**.

La **C/N_{0total}** se relaciona con las tres figuras de calidad anteriores según la ecuación 1. Este tipo de combinación hace que la C/N_{0T} resultante siempre **se aproxime a la más pequeña de las tres** que componen el cálculo. Por tanto, de nada sirve aumentar mucho uno de los sumandos si alguno de los otros dos disminuye drásticamente.

$$[1] \quad \left[\frac{n_0}{c} \right]_T = \left[\frac{n_0}{c} \right]_A + \left[\frac{n_0}{c} \right]_{IM} + \left[\frac{n_0}{c} \right]_D$$

Por ello, se debe planificar para cada sistema, cual es el punto óptimo de trabajo del transpondedor. Dicho **punto óptimo** será el que consiga que la **C/N_{0TOTAL}** del sistema sea la **mayor posible**, teniendo en cuenta que el punto de trabajo influye:

- ✚ En la **C/N_{0IM}** : Cuanto **menor** es el **IBO** en valor absoluto, **más cerca** estamos de saturación y por tanto mayor será la potencia de los IM producidos. Al acercarnos a **saturación**, por tanto, la **C/N_{0IM} disminuye**.
- ✚ En la **C/N_{0UP}** : Cuanto **menor** es el **IBO** en valor absoluto, **más cerca** estamos de **saturación** y por tanto mayor será la potencia que llega a la entrada del satélite en el canal ascendente. Al acercarnos a saturación, por tanto, la **C/N_{0UP} aumenta**.
- ✚ En la **C/N_{0DOWN}** : Cuanto **menor** es el **IBO** en valor absoluto, **más cerca** estamos de **saturación** y por tanto mayor será la potencia de salida del transpondedor del satélite en el canal descendente. Al acercarnos a saturación, por tanto, la **C/N_{0DOWN} aumenta**.

En nuestro caso, el parámetro que nos permite manejar la planificación es la **PIRE** de las **estaciones terrenas**. A medida que variemos este parámetro, **variaremos el punto de trabajo** del satélite, y por tanto la C/N_{0T} . Sabiendo esto, los pasos a seguir para llevar a cabo la planificación serán:

1. **Cálculo de la C/N_{0T}** para cumplir las condiciones de **calidad de fidelidad** del sistema en condiciones normales.
2. **Asignación de las frecuencias de portadora** de las estaciones terrenas en recepción (el proceso para transmisión será similar) en el satélite en función de las indicaciones que nos proporcionen.

David de la Mata Moya
Judith Redoli Granados

3. **Obtención** a partir del software ACRIM de la **C/I0 (C/No|IM)** para una banda de valores de IBO y de OBO para poder hacer en esos puntos los cálculos de C/NO|T
4. **Obtención de la PIRE de las estaciones terrenas** necesaria para que el satélite trabaje en **saturación**, ya que a partir de ésta podremos calcular la PIRE para cada punto de trabajo que necesitemos solo con sumarle el IBO y la **PIRE del satélite**.
5. **Cálculo de la C/NO|T** para una serie de puntos de trabajo caracterizados por un IBO y un OBO, y **obtención el punto óptimo de trabajo** y la C/NO|T óptima del enlace. Comprobación de que el punto óptimo de trabajo **cumple** con la **condición de calidad** calculada en el punto 1.
6. Cálculo de los **márgenes del uplink control y del CAG** para que el sistema esté disponible durante el 99,99% del tiempo

2.1. CÁLCULO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD

A la hora de planificar un sistema, se parte de los objetivos de calidad que deben cumplirse respecto a:

Fidelidad: calidad del sistema en funcionamiento. Nos marca una BER ($BER=10^{-6}$) que debe cumplirse para que la señal sea fiable, y una BER mínima, más allá de la cual se pierde el sincronismo y el sistema degenera ($BER=10^{-3}$).

Disponibilidad: Tiempo en el que el sistema está operativo.

A partir del **objetivo de calidad de fidelidad** en condiciones normales ($BER=10^{-6}$), y en función de la modulación y la codificación contra errores utilizada, se puede obtener cual es la E_b/N_0 mínima que cumple esa condición de fidelidad.

Para ello, disponemos de la herramienta **bertool** de Matlab, que nos dibuja las curvas de E_b/N_0 en función de la BER para un tipo de modulación y codificación contra errores dada. Una vez obtenida la curva con la herramienta zoom, podemos obtener cuál es el valor exacto (con dos decimales) de la E_b/N_0 para nuestro objetivo de tasa de bit erróneo concreto.

La E_b/N_0 se relaciona con la $C/N_0|_T$ que debe tener el sistema para asegurar esa tasa de bit erróneo según la fórmula:

$$[2] \quad C/N_0 = (E_b/N_0) + 10 \log R_b(\text{bps})$$



Donde R_b es la tasa binaria de información.



De esta manera, el objetivo de calidad de fidelidad se traslada a la planificación del enlace. Por tanto, la $C/N_0|_T$ de nuestro sistema en condiciones normales **deberá siempre ser mayor o igual que la $C/N_0|_T$ hallada a partir de la BER** para condiciones normales.

Por otra parte, el **objetivo de calidad de disponibilidad** afecta a la planificación de los enlaces ascendente y descendente. El único fenómeno que puede hacer que el sistema deje de estar operativo es la lluvia, ya que es la única atenuación que dura el tiempo suficiente (más de 10 segundos) como para llevar al sistema a un estado de indisponibilidad. Si queremos que el **sistema esté disponible el x% del tiempo** (valor de x próximo a 100), deberemos tener en cuenta en nuestros cálculos la **lluvia superada en el 100-x% del tiempo**.

En los sistemas de satélite se utilizan dos mecanismos diferentes para compensar el efecto de la lluvia:

-  **UPLINK CONTROL:** Se utiliza en el enlace ascendente, y permite controlar la PIRE de las estaciones terrenas transmisoras para compensar la lluvia. En condiciones normales la estación terrena transmite con una PIRE, pero cuando llueve ésta debe aumentar para compensar el efecto de la lluvia. Así el satélite sigue recibiendo la misma potencia de señal. Se debe calcular cuál es el **margen del uplink control**. Si el sistema debe estar disponible el x% del tiempo, el margen del uplink control debe coincidir con la **atenuación por lluvia superada en el 100-x% del tiempo** del enlace **ascendente**.
-  **CAG:** Se utiliza en el enlace descendente y permite controlar la potencia de la señal recibida en las estaciones terrenas receptoras. En condiciones normales la señal recibida en la estación terrena receptora será P_r , pero cuando llueve será menor. El CAG amplifica la señal recibida en la estación terrena receptora cuando llueve, para compensar la atenuación debida a la lluvia y que el receptor siga viendo siempre la misma potencia a su entrada. Se debe calcular cuál es el **margen del CAG**. Si el sistema debe estar disponible el x% del tiempo, el margen del CAG control debe coincidir con la **atenuación por lluvia superada en el 100-x% del tiempo** del enlace **descendente**.

En esta práctica, **planificaremos** el sistema para **cumplir el objetivo de disponibilidad y optimizar el funcionamiento del transpondedor** y **analizaremos** a posteriori si **cumple el objetivo de calidad de fidelidad**.

NOTA: Tanto el **margen del UPC como del CAG** se definen con una **precisión de unidades**. Es decir, si tenemos que compensar un **margen de 11,4dB** deberemos **utilizar un UPC o CAG de 12dB**



2.2. ASIGNACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE PORTADORA DE LAS ESTACIONES

Cada estación terrena tendrá asignadas dos portadoras, una para el enlace ascendente (banda de 14GHz) y otra para el descendente (banda de 11-12GHz). En nuestro caso, haremos la **asignación en la banda del canal descendente** (11-12GHz) dado que son esas portadoras las que van a entrar al HPA, y son las que transmitirá el satélite hacia las estaciones terrenas. Son, por tanto, las portadoras que necesitamos para hacer los cálculos de los productos de intermodulación.

No obstante, es importante tener claro que las estaciones terrenas transmiten en otra frecuencia situada en la banda de 14GHz, que al mezclarse con el oscilador local del satélite pasan a FI (frecuencia intermedia) y se vuelven a subir de frecuencia a la banda de 11-12GHz con otro OL antes de pasar al HPA (figura 2)

A fin de asignar a cada estación la frecuencia de portadora en la que debe trabajar, debemos establecer los **criterios** según los cuales vamos a **repartir el ancho de banda del transpondedor**.

El caso más simple es aquel en el que **todas las portadoras son iguales**. En este caso, el **ancho de banda se reparte a partes iguales entre todas ellas**.

El transpondedor contará con una **banda de guarda** entre la primera portadora y el extremo superior e inferior de la banda, y la última portadora y el extremo superior de la banda, como en la figura 4.

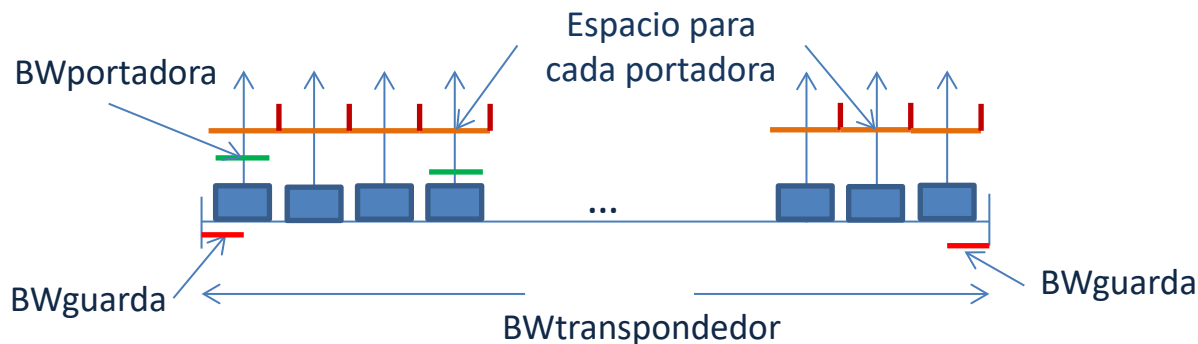


Figura 4. Asignación de portadoras en el transpondedor

Para asegurar que las portadoras caben en el transpondedor, debemos comprobar que el **ancho de banda** de cada **portadora** siempre es **menor o igual** que el **espacio** de ancho de banda **que le corresponde** dentro del transpondedor.

Para calcular el ancho de banda de la portadora, debemos tener en cuenta la codificación contra errores utilizada.

David de la Mata Moya
Judith Redoli Granados



CÁLCULO DEL ANCHO DE BANDA DE LA SEÑAL

Una forma de aumentar la fiabilidad de las señales digitales, es decir, de hacerlas más resistentes al ruido, es utilizar codificación contra errores. La codificación contra errores de canal en sistemas radio suele ser codificación FEC (forward error correction), es decir, los errores del canal se corrigen en recepción, a partir de ciertos bits redundantes enviados desde el transmisor.

Los códigos FEC pueden ser códigos de bloques (n,k) o convolucionales (k/n). Hoy en día se usan generalmente los dos tipos de códigos (un código de bloques exterior, típicamente Reed-Solomon), y un código de bloques interior (convolucional) dentro de un mismo sistema. La combinación de los dos tipos de código permite una mayor eficiencia en la corrección de errores.

En esta práctica nos centraremos en los códigos de bloques. Los bits o símbolos (se forma un símbolo cuando tratamos los bits en grupos en vez de individualmente) se transmiten en palabras de longitud n, que contienen k símbolos de información. Los n-k símbolos restantes se utilizan en recepción para detectar errores en los k símbolos de información, y en algunos casos corregirlos. Con ello, se reduce la probabilidad de bit erróneo.

Existen diversos tipos de códigos de bloques. En la práctica usaremos los códigos de bloques Reed-Solomon, que tienen las siguientes características:

- ✚ Cada símbolo está constituido por "m" bits consecutivos agrupados.
- ✚ Cada palabra consta de "k" símbolos de información, y "r" símbolos de paridad.
- ✚ La longitud de la palabra de código es $n=k+r$ símbolos.
- ✚ Se establece la relación: $n=2^m-1$ entre la longitud de la palabra código (n) y el número de símbolos 2^m .
- ✚ Es capaz de corregir errores en "t" símbolos, donde $t=(n-k)/2=r/2$.

Un código Reed-Solomon típico es el código (204,188), con $n=255$, $k=239$, $r=16$, $m=8$.

Es importante no confundir los símbolos en los que se agrupan los bits para codificarlos, de los símbolos en los que se agrupan los bits para generar la modulación.

En la práctica, siempre que nos refiramos a **símbolos**, estaremos refiriéndonos a los **símbolos generados en el modulador**. En ningún momento trataremos con los símbolos de codificación.

La tasa binaria real de transmisión aumenta cuando utilizamos códigos FEC. En concreto:

$$[3] \quad R_{\text{breal}} = R_{\text{binfo}} * \frac{n}{k}$$

Además, en la práctica el filtrado que se lleva a cabo no es el filtrado ideal de Nyquist, pues se produciría interferencia entre símbolos, ya que los lóbulos laterales de los pulsos generados son

muy altos. Se buscan filtros que se aproximen al máximo al ideal, pero eliminando la interferencia entre símbolos.

Los filtros escogidos son los filtros de coseno alzado. Permiten reducir la interferencia entre símbolos, a costa de aumentar ligeramente el ancho de banda.

Los **filtros de coseno alzado** se caracterizan mediante el parámetro α (r en la figura), que varía entre 0 y 1. Cuanto **mayor** es el valor de α , **menores** son los **lóbulos laterales** de la respuesta al impulso del canal (es decir, de la forma del pulso con el que conformamos los ceros y los unos para transmitirlos a través del canal). Ver figura 5.b. La reducción de esos lóbulos laterales se traduce en una **menor interferencia entre símbolos**, haciendo que la señal sea menos vulnerable. El inconveniente es que al aumentar α , también **aumenta el ancho de banda de la señal**. Ver figura 5.a.

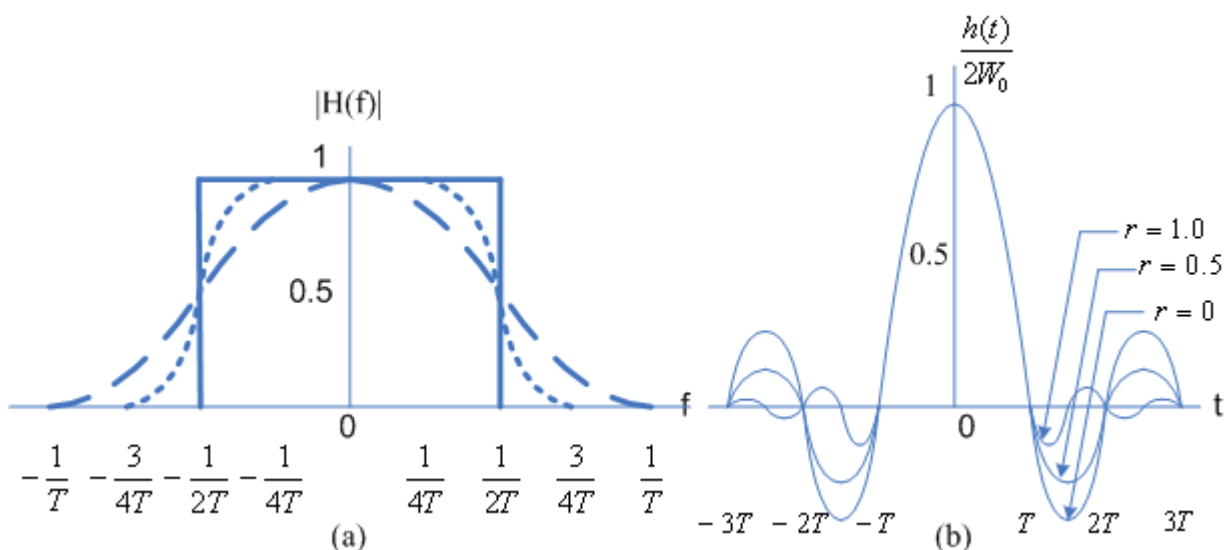


Figura 5. Respuesta en frecuencia (a) y en tiempo (b) de filtros de coseno alzado en función de alfa (r)

En general, en comunicaciones se suelen usar factores de roll-off entre 0,4 y 0,6.

Para señales digitales, el ancho de banda de la portadora dependerá de la tasa de símbolo R_s , y del filtro de conformación del pulso que se utilice:

En concreto, para modulaciones M-PSK y M-QAM, y filtros de conformación del pulso de coseno alzado:

$$[4] \quad B = (1 + \alpha) R_s$$

Donde R_s es la tasa de símbolo, que se relaciona con la tasa de bit según:

David de la Mata Moya
Judith Redoli Granados



[5]
$$R_s = \frac{R_{b\text{ real}}}{\log_2 M}$$

Y α es el factor de roll-off del filtro de coseno alzado.

2.3. CALCULO DE C/I0 MEDIANTE EL SOFTWARE ACRIM

Para calcular la C/No|total del enlace, necesitamos conocer cuál es la C/I0 del satélite, es decir cuál es la diferencia entre el nivel de la portadora y el nivel del ruido de intermodulación.

El software ACRIM solo funciona en Windows XP o versiones de Windows inferiores. Si no disponéis de un ordenador con sistema operativo Windows XP, podéis instalar el emulador 2BOX o la máquina virtual de XP VMWARE para poder ejecutar el ACRIM sin problemas.

Los pasos a seguir son:

- ✚ Antes de abrir la herramienta, duplica los ficheros demo.asf y demo.dts y dales un nombre específico, por ejemplo grupo1.asf y grupo1.dts. Estos son los ficheros que utilizarás para guardar tu planificación.
- ✚ A continuación, ejecuta el programa ACRIM.
- ✚ Pincha en el menú **Data – Freq Assign File**. Selecciona el fichero grupo1.asf. En él se grabarán las frecuencias de las portadoras que tú introduzcas para tu simulación.
- ✚ Pincha en el menú **Data – Type File**. Selecciona el fichero grupo1.dts. En él se grabarán los tipos de portadoras que generes para tu simulación.
- ✚ Pincha en el menú **Data – TWTA Modeling**. Asegúrate de que las frecuencias inicial y final del transpondedor se corresponden con las del transpondedor que tú quieres simular. Si no es así, tendrás problemas a la hora de crear las portadoras. **Fíjate bien** en que la **frecuencia** que aparece **en primer lugar** es la **superior**, y la que **aparece debajo** es la **inferior**. Para las simulaciones se utilizará el TWTA (Travelling Wave Tube Amplifier) descrito en el fichero TWTAMOD.LST, que es un tipo de HPA.
- ✚ Pincha en el menú **File – Assignment Edit**. Se abre una pantalla en la que debes introducir los tipos de portadoras de tu sistema, caracterizadas por su potencia y su ancho de banda, las frecuencias de todas las portadoras y el punto de trabajo en el que deseas realizar la simulación.
 - ∞ Cuadro de la izquierda: puedes insertar, editar o borrar tipos de portadoras. Cada tipo de portadora se caracteriza por tres parámetros:
 - El **nombre de la portadora**: generalmente se le asigna la modulación y el ancho de banda para facilitar la identificación. En cualquier caso, puedes elegir el nombre **que desees**.



- La **potencia de la portadora**: Se introduce en unidades naturales y el valor está normalizado a la portadora de mayor potencia. Es decir, a la portadora de mayor potencia debe asignársele el **valor 1**. En caso de tener portadoras con distintas potencias, la potencia del resto de portadoras serán fracciones de la unidad calculados como P_i/P_{max} para la portadora i , pues están referidas a la portadora de mayor potencia.
 - El **ancho de banda**: se refiere al ancho de banda **de la portadora** y se introduce en **MHz**.
- ∞ En el cuadro de la derecha puedes insertar, editar o borrar portadoras. Cada portadora se caracteriza por dos parámetros:
- Su frecuencia: es la **frecuencia exacta** de una portadora y se introduce en **MHz**.
 - El **tipo** al que pertenece: cada tipo se identifica con un **número** (1, 2, 3...). Aquí introducirás el número del tipo al que pertenece cada portadora.
- ∞ En el cuadro inferior puedes seleccionar dos casos:
- **Single-carrier case output**. Para trabajar con una sola portadora accediendo al transpondedor. Indica que trabajamos en saturación.
 - **Input**. Para trabajar con varias portadoras accediendo al transpondedor. En este caso, además, debes **indicar** cuál es el **IBO en valor absoluto (dB)** con el que quieres que trabaje el transpondedor. Este es el valor de IBO que tomará la herramienta para realizar la simulación

Pulsa OK para guardar la configuración inicial. Tu planificación ya está grabada en la herramienta y está lista para simular.

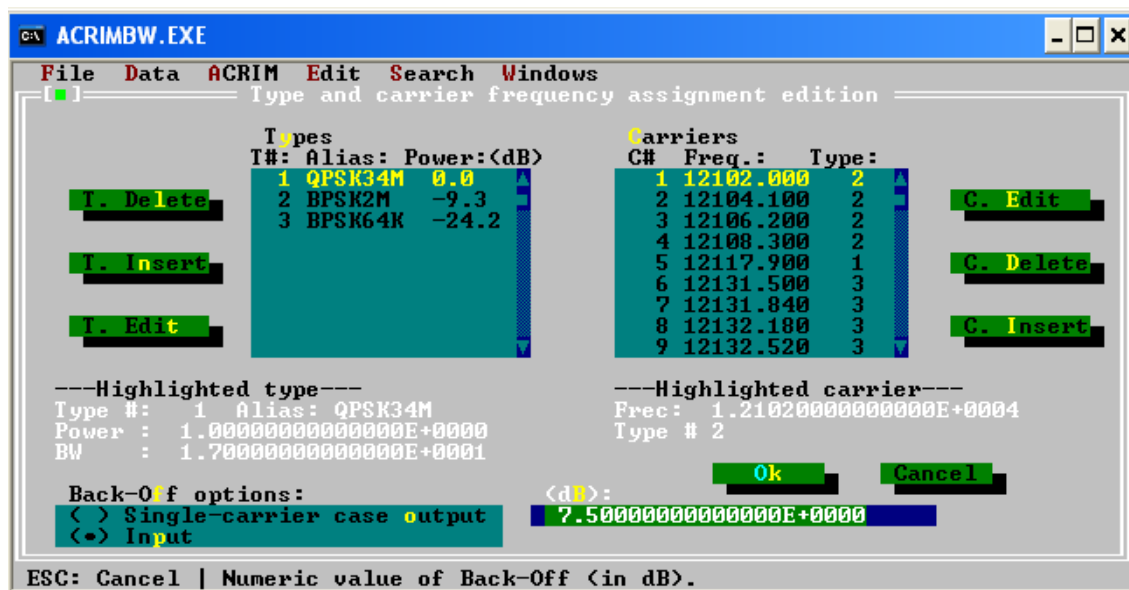


Figura 6. Pantalla ASSIGNMENT EDIT del software ACRIM

- ✚ Pincha en el menú **ACRIM-Simulation**. Se abre una pantalla en la que debes seleccionar lo que quieres simular (sólo nos interesa **simular el espectro y los productos IM de tercer orden**, pues son los que más influyen y ahorramos tiempo de simulación), y el **margen** en el que quieres que se represente (**mantenemos el presentado por defecto**). Pulsa **Run** para que se ejecute, y aparecerá la representación gráfica.
- ✚ Ahora pincha en el menú **ACRIM-Post processor** para obtener los valores numéricos de interés de la simulación. Puedes elegir el rango de frecuencias en el que se calculan los productos de intermodulación, pulsando uno de los tres botones:
 - ∞ **GLOBAL**: Muestra la $C/N|_{IM}$ considerando el rango de frecuencias de nuestro transpondedor y de los inmediatamente adyacentes a él.
 - ∞ **TRANSPONDER**: Muestra la $C/N|_{IM}$ considerando el rango de frecuencias de nuestro transpondedor. Es el valor que nos interesa y **el que nos da el programa por defecto**.
 - ∞ **CARRIER**: Te lleva a la pantalla Assignment Edit para que selecciones la portadora sobre la que quieres que te muestre la $C/N|_{IM}$.

De esta pantalla debes extraer los valores del **IBO (input-backoff)**, el **OBO** resultante (**output backoff**) y la relación $C/N|_{IM}$ generada en el transpondedor para ese punto de trabajo.

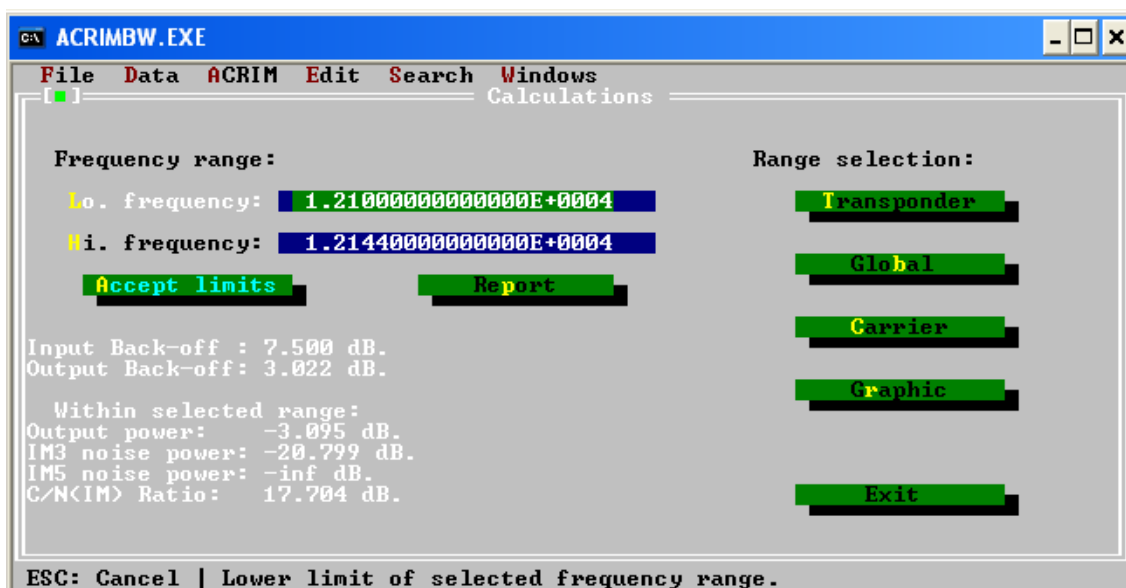


Figura 7. Pantalla POST PROCESOR del software ACRIM

NOTA 1: Deberás generar **una nueva simulación** para cada punto de trabajo que quieras evaluar, es decir, **para cada IBO**.

NOTA 2: Para salir, pulsa Quit en el menú File. **NO OLVIDES** Responder Yes a la pregunta Save Environment? antes de salir definitivamente del programa, para que todo el trabajo realizado hasta el momento se guarde. **Sólo se guardan los datos de la última simulación realizada.**

Para los cálculos del enlace tomaremos el valor de $C/N|_{IM}$ para todo el transpondedor, ya que este dato nos da la C/I promediada para todas las portadoras (que en este caso son iguales), a fin de simplificar los cálculos. Una vez calculada la C/I ($C/N|_{IM}$), debes calcular la C/I_o , pues ese es el dato que necesitas utilizar en el balance de enlace según la ecuación relación $C/I = C/I_o \cdot 1/BN$, donde BN es el ancho de banda de ruido de la portadora.

CÁLCULO DEL ANCHO DE BANDA DE RUIDO

El ancho de banda de ruido de una señal digital es el ancho de banda de un espectro ficticio rectangular de tal forma que la potencia dentro de esa banda sea equivalente a la potencia asociada con el espectro de la señal. Coincide con el ancho de banda del filtro de Nyquist, que es la tasa de símbolos de la señal.

David de la Mata Moya
Judith Redoli Granados

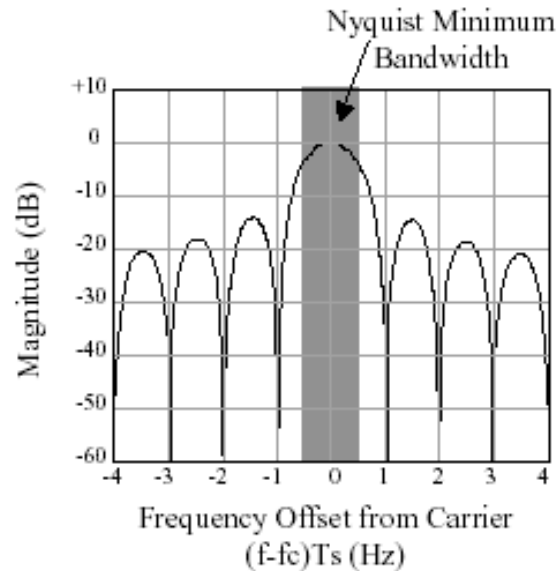


Figura 8. Ancho de banda teórico ideal de Nyquist

Para señales multinivel M-PSK y M-QAM, el ancho de banda de ruido es:

$$[6] \quad B_N = R_s = \frac{R_{b \text{ real}}}{\log_2 M}$$

2.4. CALCULO DE LA PIRE MÁXIMA DE LAS ESTACIONES TERRENAS

Ya hemos dicho que en los sistemas de comunicaciones por satélite tenemos dos enlaces: el enlace ascendente y el enlace descendente.

Además, en sistemas de comunicaciones por satélite en los que varias estaciones terrenas comparten el transpondedor del satélite en frecuencia (**FDMA**), el **flujo de potencia** que llega al **satélite** es la **suma de los flujos de potencia de todas las estaciones terrenas transmisoras** que comparten el satélite. Esto es debido a que todas las estaciones transmiten simultáneamente hacia el satélite.

El **parámetro que caracterizará al satélite en recepción** será el **flujo de potencia de saturación**, por tanto, el **primer cálculo** inicial consistirá en **obtener** cual es la **potencia máxima de cada estación terrena**, es decir, la potencia que haría que el **satélite** trabaje en **saturación**, si solo hay una estación terrena transmitiendo.

La PIRE de una estación que genera, por sí sola, el flujo de saturación del satélite en condiciones de espacio libre se obtiene a partir de la fórmula del flujo (ecuación [7]).

$$[7] \quad \varphi_{SATELITE}(W/m^2) = \frac{pire_{et}}{4\pi d^2} \Rightarrow PIRE_{et} = \varphi_{SATELITE}(dBW/m^2) + 10 \log(4\pi d^2)$$

Si además de las pérdidas en espacio libre, el enlace experimenta **pérdidas adicionales** o es **necesario incluir un margen**, se deberá **aumentar la PIRE para compensar tanto las pérdidas adicionales como el margen**.

Cuando existen varias estaciones compartiendo el transpondedor en frecuencia, todas ellas transmiten simultáneamente, por tanto, la PIRE que debe transmitir cada estación será menor que la calculada anteriormente y dependerá del ancho de banda de cada estación y del punto de trabajo del transpondedor. La PIRE transmitida por cada estación será entonces $PIRE_{et} + IBO_{portadora}$.

En el enlace descendente, la PIRE máxima del satélite también se debe repartir entre todas las portadoras que lo comparten. Así, la PIRE que transmite el satélite en cada portadora dependerá también del ancho de banda de cada estación y del punto de trabajo del transpondedor y será $PIRE_{SAT} + OBO_{portadora}$.

2.5. CÁLCULO DE LA C/NO_T

A la hora de planificar el enlace, las C/No del enlace se calculan en condiciones normales, ya que, como hemos visto en el primer apartado, esas son las condiciones en las que trataremos de que funcione nuestro enlace en el 99,99% del tiempo, usando las tecnologías apropiadas en las estaciones terrenas.

El balance de enlace para el enlace ascendente y descendente se calcula de forma similar al balance de enlace de dos vanos de un radioenlace. En este caso, la C y la No se calculan siempre en bornas de la antena receptora.

Para hacer que el satélite opere en un **punto de trabajo (IBO_{tpd}, OBO_{tpd})**, se debe **ajustar la PIRE** de las estaciones terrenas **sumándole el IBO_{portadora}** que dependerá del **IBO_{tpd}** y de cuanto ancho de banda ocupe la portadora respecto al ancho de banda total ocupado en el transpondedor.

$$[8] \quad IBO_{portadora} = IBO_{tpd} + 10 \log \left(\frac{BW_{portadora}}{BW_{ocupado}} \right)$$

Esto hace que se modifique la $\left. \frac{C}{N_0} \right|_a$:

$$[9] \quad \left. \frac{C}{N_0} \right|_a = PIRE_{et} + IBO_{portadora} - L_{bfa} - L_a - M_a + \left. \frac{G}{T} \right|_{sat} - 10 \log K(\text{dB})$$



Por otra parte, el hecho de operar en un **punto de trabajo** (IBO_{tpd} , OBO_{tpd}), hace que la PIRE de salida del satélite también disminuya en función del OBO_{tpd} y de cuanto ancho de banda ocupe la portadora respecto al ancho de banda total ocupado en el transpondedor.

$$[10] \quad OBO_{portadora} = OBO_{tpd} + 10 \log \left(\frac{BW_{portadora}}{BW_{ocupado}} \right)$$

Esto hace que se modifique la $\left. \frac{C}{N_0} \right|_d$.

$$[11] \quad \left. \frac{C}{N_0} \right|_d = PIRE_{SAT} + OBO_{portadora} - L_{bfd} - L_d - M_d + \left. \frac{G}{T} \right|_{et} - 10 \log K(\text{dB})$$

Además, la $\left. \frac{C}{N_0} \right|_{IM}$ es diferente para cada punto de trabajo.

Por tanto, para calcular la $C/N_0|_T$ óptima, se debe obtener dicha $C/N_0|_T$ para una serie de puntos según la ecuación [1]. Aquel punto en el que se produzca un máximo será el punto óptimo.

Una vez planificado el sistema, se debe analizar si el sistema óptimo cumple con las especificaciones en cuanto a objetivos de calidad se refiere, tal y como se especifica en el apartado 2.1.

2.6. PLANIFICACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD SISTEMA

Por otra parte, se deben planificar los mecanismos de control en el enlace ascendente y descendente (UPC y CAG) para que el sistema esté operativo el 99,99% del tiempo, tal y como se especifica en el apartado 2.1.

3. GUÍA DE USO DEL SOFTWARE ACRIM

El software ACRIM solo funciona con XP o versiones de Windows inferiores. Si no disponéis de un ordenador con sistema operativo Windows XP, podéis instalar el **emulador DOSBOX** o la **máquina virtual** de XP **VMWARE** para poder ejecutar el ACRIM sin problemas.

- ✚ En primer lugar, duplica los ficheros demo.asf y demo.dts y dales un nombre específico, por ejemplo grupo1.asf y grupo1.dts, pues en ellos se guardarán los datos de la planificación.
- ✚ A continuación ejecuta el programa ACRIM.
- ✚ Pincha en el menú **Data – Freq Assign File**. Selecciona el fichero grupo1.asf. En él se grabarán las frecuencias de las portadoras que tu introduzcas para tu simulación.
- ✚ Pincha en el menú **Data – Type File**. Selecciona el fichero grupo1.dts. En él se grabarán los tipos de portadoras que crees para tu simulación.
- ✚ Pincha en el menú **Data – TWTA Modeling**. Asegúrate de que las frecuencias inicial y final del transpondedor se corresponden con las del transpondedor que tú quieres simular. Si no es así, tendrás problemas a la hora de crear las portadoras.



- ✚ Pincha en el menú **File – Assignment Edit**. Se abre una pantalla en la que debes introducir los tipos de portadoras de tu sistema, caracterizadas por su potencia y su ancho de banda, las frecuencias de todas las portadoras y el punto de trabajo en el que deseas realizar la simulación.
 - En el cuadro de la izquierda puedes insertar, editar o borrar tipos de portadoras. La potencia de la portadora se introduce en unidades naturales. A la portadora de mayor potencia se le asigna una potencia de 1. La potencia del resto de portadoras serán fracciones de la unidad, pues están referidas a la portadora de mayor potencia. El ancho de banda se introduce en MHz.
 - En el cuadro de la derecha puedes insertar, editar o borrar portadoras. Cada portadora se caracteriza por su frecuencia y el tipo al que pertenece. La frecuencia de portadora se introduce en MHz.
 - En el cuadro inferior puedes seleccionar dos casos:
 - ∞ Single-carrier case output. Para trabajar con una sola portadora accediendo al transpondedor.
 - ∞ Input. Para trabajar con varias portadoras accediendo al transpondedor. En este caso además, debes seleccionar cual es el IBO con el que quieres que trabaje el transpondedor (dB).
- ✚ Pulsa OK para guardar la configuración inicial.
- ✚ Pincha en el menú **ACRIM-Simulation**. Se abre una pantalla en la que debes seleccionar tu simulación (sólo nos interesa simular el espectro y los productos IM de tercer orden, pues son los que más influyen y ahorramos tiempo de simulación), y el margen en el que quieres que se represente. Pulsa Run para que se ejecute, y aparecerá la representación gráfica.
- ✚ Para obtener los valores numéricos de interés de la simulación, pincha en el menú **ACRIM-Post processor**. Podrás observar el rango en el que se calculan los productos de intermodulación. Puedes seleccionar ese rango en los botones de la derecha. En nuestro caso nos interesa la valoración de los productos de intermodulación en todo el transpondedor. De esta pantalla debes extraer los valores del IBO (input-backoff), el OBO resultante (output backoff) y la relación C/I generada en el transpondedor para ese punto de trabajo.

NOTA 1: Deberás generar **una nueva simulación** para cada punto de trabajo que quieras evaluar, es decir, **para cada IBO**.

NOTA 2: Para salir, pulsa Quit en el menú File. **NO OLVIDES** Responder Yes a la pregunta Save Environment? antes de salir definitivamente del programa, para que todo el trabajo realizado hasta el momento se mantenga. **Sólo se guardan los datos de la última simulación realizada.**

David de la Mata Moya
Judith Redoli Granados



4. ENUNCIADO DEL EJEMPLO PRÁCTICO DE PLANIFICACIÓN

Se trata de planificar un **transpondedor** de 54 MHz del satélite Amazonas 3 que establecerá enlaces bidireccionales entre **4 telepuertos** situados en Europa, Norteamérica y Sudamérica. El esquema de transmisión que se va a utilizar es **TDM/8-PSK/FDMA**. Cada portadora transmite una velocidad de información de 16Mbps, conformadas en coseno alzado con $\alpha=0,286$ y con una codificación contra errores de bloques Hamming (7,4). Para los cálculos del balance de enlace se considera una frecuencia de 14 GHz para el enlace ascendente y 12 GHz para el descendente. El transpondedor utilizado es el número 7, cuyas frecuencias inicial y final son 11886 MHz y 11940 MHz, la banda de guarda en cada extremo de la banda debe ser de 7.5 MHz. Las portadoras deben distribuirse uniformemente en el transpondedor.

Se desea planificar el enlace para que el sistema cumpla con los objetivos de calidad de fidelidad (en nuestro caso, asegurar una $BER=10^{-6}$) y de calidad de disponibilidad (el sistema debe estar disponible durante el 99,99% del tiempo). Normalmente se calcula el balance de enlace para todas las estaciones del sistema, dado que, aunque tenga las mismas características, están en distintas localizaciones sometidas a diferentes condiciones atmosféricas. En este caso realizaremos un único balance de enlace, tomando como estación transmisora la situada en Colombia y como receptora la situada en Inglaterra para simplificar el problema, y asumiremos que ese balance de enlace es válido para la comunicación entre dos cualesquiera de los cuatro telepuertos que comparten el transpondedor. En adelante denominaremos a los telepuertos con el nombre más genérico de estaciones terrenas. Para ello, se proporcionan los datos siguientes:

Datos del transpondedor del satélite:

- Flujo de saturación: -85.5 dBW/m^2 .
- PIRE de saturación: 50 dBW
- G/T: 7,5 dB/K

Datos de la estación terrena receptora:

- G/T de la estación terrena: 31 dB/K.

Datos de los enlaces ascendente y descendente:

- Considérense un margen adicional de 0,5 dBs debido al error de puntería total (antena del satélite y antena de la estación terrena) y de 0,2 dB debido a pérdidas por despolarización en la antena receptora en ambos enlaces.
- La atenuación debida a gases atmosféricos es de 0,12 dB en el uplink y de 0,10 dB en el downlink.
- La atenuación debida a nubes es de 0,19 dB en el uplink y 0,16 dB en el downlink.

David de la Mata Moya
Judith Redoli Granados



- La distancia de las estaciones terrenas al satélite depende de la relación entre la posición del satélite y de las estaciones terrenas sobre la superficie terrestre. La distancia desde la estación terrena transmisora es 36010 km y desde la estación terrena receptora es 40500km.
- Las dos estaciones seleccionadas para realizar el balance de enlace son las situadas en las zonas climáticas de mayor y menor intensidad de lluvia. De esta forma, se puede calcular el margen máximo y mínimo necesario en el sistema para asegurar una disponibilidad del 99,99% del tiempo.
 - La estación transmisora está situada en Colombia, en las coordenadas [4.5°N, 74.3°W] y su altitud sobre el nivel del mar es 2.769 km. La antena apunta al satélite con una elevación de 73.52°.
 - La estación receptora está situada en Inglaterra en las coordenadas [51.46075°N, 2.59245°W] y su altitud sobre el nivel del mar es 0.066 km. La antena apunta al satélite con una elevación de 10.60°.
 - Ambas antenas están polarizadas horizontalmente
- Las estaciones terrenas se van a equipar con mecanismos de control (apartado 2.1) en transmisión y recepción para cumplir con el objetivo de calidad de disponibilidad. Los márgenes disponibles son los siguientes:
 - Mecanismo de control en transmisión: 5, 10, 15 y 20dB.
 - Mecanismo de control en recepción: 5, 7, 9 y 12dB.

EJERCICIO 1: OBTENCIÓN DEL OBJETIVO DE CALIDAD DE FIDELIDAD

- Simula con la herramienta bertool de Matlab la curva de BER en función E_b/N_0 para tu esquema de modulación-codificación. Utiliza los datos del enunciado del ejemplo práctico para configurar los parámetros de entrada que la herramienta te pide.
- Calcula la $C/N_0|_T$ mínima que debe ver el receptor para que el sistema cumpla el objetivo de calidad de fidelidad especificado (apartado 2.1).

EJERCICIO 2: CÁLCULO DE LA $\frac{C}{N_0}|_{IM}$ DEL TRANSPONDEDOR DEL SATÉLITE

Dado que el transpondedor es compartido en frecuencia, el TWTA que se encarga de amplificar la señal en el satélite antes de difundirse a las estaciones terrenas receptoras, generará productos de intermodulación (IM) que se manifestarán como un ruido de intermodulación. Ese nivel de ruido de IM dependerá del punto de trabajo del TWTA, y más concretamente, de su proximidad a saturación.

- En primer lugar, distribuye las portadoras en el transpondedor conforme a los requisitos que se plantean en el enunciado del problema, y anota las frecuencias de las 4 portadoras. Calcula además el ancho de banda de las portadoras, para asegurarte de que están bien distribuidas y sus anchos de banda no se solapan.

David de la Mata Moya
Judith Redoli Granados



- Para los valores de las portadoras calculados, simula con el software ACRIM el comportamiento del transpondedor y obtén el OBO y la $\left.\frac{C}{N}\right|_{IM}$ para los valores de IBO -8.5 dB, -9 dB, -9,5 dB, -10 dB, -10,5 dB y -11 dB. Calcula a partir de los datos obtenidos de la simulación los valores de la $\left.\frac{C}{N_0}\right|_{IM}$ para cada punto de trabajo (apartado 2.3).

EJERCICIO 3: CÁLCULO DE LA $\left.\frac{C}{N_0}\right|_{up}$ POR PORTADORA

- En primer lugar, calcula la PIRE de saturación de la estación terrena transmisora para que el satélite trabaje en saturación en caso de que hubiera una única estación transmitiendo al satélite. A continuación, calcula el IBO de portadora.
- Ahora calcula todas las pérdidas del enlace ascendente y la $\left.\frac{C}{N_0}\right|_{up}$ mediante el balance de enlace para todos los puntos de trabajo del ejercicio 2.

EJERCICIO 4: CÁLCULO DE LA $\left.\frac{C}{N_0}\right|_{down}$ POR PORTADORA

- En primer lugar, calcula el OBO de portadora.
- Ahora calcula todas las pérdidas del enlace descendente y la $\left.\frac{C}{N_0}\right|_{down}$ mediante el balance de enlace para todos los puntos de trabajo del ejercicio 2.

EJERCICIO 5: CÁLCULO DEL PUNTO ÓPTIMO DE TRABAJO

- Calcula la $\left.\frac{C}{N_0}\right|_T$ para todos los puntos de trabajo del ejercicio 2, selecciona el que consideres el punto óptimo de trabajo y comprueba si cumple con el objetivo de calidad de fidelidad.

EJERCICIO 6: OBJETIVO DE CALIDAD DE DISPONIBILIDAD EN EL ENLACE ASCENDENTE

Para cumplir con el objetivo de disponibilidad en el enlace ascendente, se debe escoger el mecanismo de control con margen más adecuado. Calcula la atenuación por lluvia que se debe considerar para asegurar una disponibilidad del 99,99% del tiempo en el enlace ascendente y define el mecanismo de control y el margen que debes implementar en las estaciones terrenas transmisoras. Para ello, sigue los siguientes pasos:

- Utiliza el modelo de predicción de la altura de lluvia de la recomendación REC 839-4 para calcular la altura de la isoterma h_0 y a partir de ella, la altura de lluvia de la estación terrena del enlace ascendente.
- Utiliza la función proporcionada por la recomendación REC 837-7 para calcular la intensidad de lluvia para las coordenadas de la estación terrena del enlace ascendente. Asegúrate de que los ficheros de los mapas estén ubicados en la misma carpeta al ejecutar la función.



- Calcula la atenuación de lluvia para el enlace ascendente y selecciona el mecanismo de control que utilizarías en el enlace ascendente y su margen.
- Define cuales serían los valores teóricos mínimo y máximo de la PIRE de las estaciones terrenas y los valores mínimo y máximo de PIRE que proporciona el mecanismo de control.

EJERCICIO 7: OBJETIVO DE CALIDAD DE DISPONIBILIDAD EN EL ENLACE DESCENDENTE

- Para cumplir con el objetivo de disponibilidad en el enlace descendente, se debe escoger el mecanismo de control con margen más adecuado. Calcula la atenuación por lluvia que se debe considerar para asegurar una disponibilidad del 99,99% del tiempo en el enlace descendente y define el mecanismo de control y el margen que debes implementar en las estaciones terrenas receptoras. Para ello, sigue los siguientes pasos:
- Utiliza el modelo de predicción de la altura de lluvia de la recomendación REC 839-4 para calcular la altura de la isoterma h_0 y a partir de ella, la altura de lluvia de la estación terrena del enlace descendente.
- Utiliza la función proporcionada por la recomendación REC 837-7 para calcular la intensidad de lluvia para las coordenadas de la estación terrena del enlace descendente. Asegúrate de que los ficheros de los mapas estén ubicados en la misma carpeta al ejecutar la función.
- Calcula la atenuación de lluvia para el enlace descendente y selecciona el mecanismo de control que utilizarías en el enlace ascendente y su margen.

CONCLUSIONES:

En tus conclusiones reflexiona acerca de las siguientes cuestiones:

- ¿Cómo influye la BER en $\left. \frac{C}{N_0} \right|_T$?
- ¿Qué es lo que hace variar $\left. \frac{C}{N} \right|_{IM}$ con el punto óptimo de trabajo?
- ¿Qué parámetro es el que me permite variar el punto de trabajo del satélite?
- ¿Cómo influye la PIRE de las estaciones en el balance de enlace?
- ¿Cómo afecta la PIRE de las estaciones terrenas a la PIRE del satélite?
- ¿Cómo influye la PIRE del satélite en el balance de enlace?
- ¿Cuál es el efecto que se produce sobre los distintos componentes del balance de enlace total al variar el punto de trabajo?
- Si tuvieras que realizar el balance de enlace de cada una de las estaciones teniendo en cuenta sus condiciones climáticas ¿Cómo plantearías la planificación?

David de la Mata Moya
Judith Redoli Granados

PRÁCTICA 3

- Si una estación es transmisora y receptora a la vez, ¿en qué varía la atenuación por lluvia para su enlace ascendente y descendente?
- ¿Qué crees que modela la corrección en el cálculo de la Lef?