
Capítulo 5 Fuentes de interferencia en un sistema de comunicación satelital no relacionadas con otros sistemas satelitales

5.1 Generación de interferencias en amplificadores de potencia

5.1.1 No linealidad de los amplificadores de potencia

Cuando un amplificador de potencia entrega a su salida el máximo de potencia posible, se dice que opera en su punto de saturación; para que esto ocurra, la potencia total de las señales que entran a él debe tener un valor determinado. Sin embargo, cuando se trabaja en el punto de saturación, existe el riesgo de operar en estados no lineales de amplificación.

En estados lineales, la relación de potencia de la salida es la misma al aumentar o disminuir la potencia en la entrada, sin embargo, cuando se trabaja en un estado no lineal, la relación de amplificación es distinta, ya que después del punto de saturación, la potencia tiende a fluctuar debido a la inestabilidad del amplificador.

La no linealidad induce a tres tipos de efectos no deseados:

- La generación de señales no deseadas que interfieren con las señales deseadas. Estas señales no deseadas se pueden considerar como interferencia de ruido (ruido blanco) para el cálculo de (C/N_0) .
- La degradación del rendimiento promedio del BER en el caso de transmisiones digitales
- La reducción de la potencia de salida, debido a la necesidad de operar el amplificador en una región lineal.

Estos efectos pueden reducirse con el uso de linealizadores, por ejemplo, circuitos de predistorción de gran ancho de banda localizados en la entrada del amplificador.

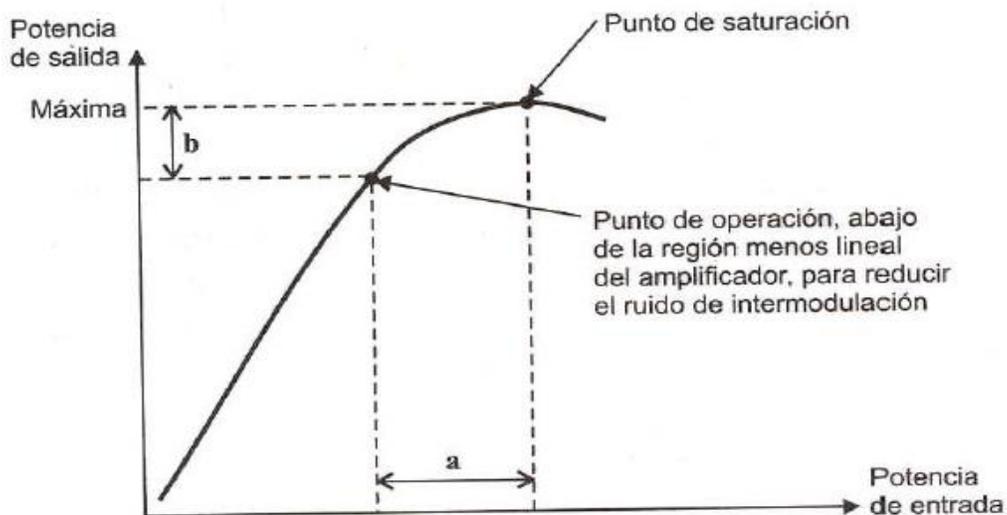


Figura 5-1: Curva característica no lineal de entrada-salida de un amplificador de potencia; a es la reducción necesaria de la potencia a la entrada respecto al valor que satura al amplificador, para poder trabajar en el punto de operación, y b es la reducción que se obtiene en la potencia de salida respecto a la potencia máxima que se obtendría en saturación.

La no linealidad no afecta sensiblemente la calidad de los enlaces que operan con una sola portadora. Sin embargo, en los casos en que se tienen varias portadoras transmitiendo a diferentes frecuencias en el ancho de banda del amplificador de potencia, las no linealidades suelen causar lo que se conoce como ruido de intermodulación provocando el surgimiento de señales no deseadas.

Debido a esto, es preciso operar los amplificadores de potencia en un punto de trabajo inferior al de saturación para reducir así el ruido de intermodulación y su efecto sobre la información original, aunque para ello se tenga que sacrificar potencia de salida. A la reducción de la potencia en la entrada se le conoce como "back-off" de entrada, y a la reducción a la salida se le llama "back-off" de salida. En la figura 5-1, se indican como **a** y **b** respectivamente.

5.1.2 Productos de intermodulación

Se conoce como productos de intermodulación a las nuevas componentes de frecuencias generadas a la salida de un dispositivo (en este caso particular, del amplificador de potencia) que opera en región de respuesta no lineal.

Son provocados por el inadecuado ajuste del punto de operación cuando se trabaja en modo de multiportadoras (siendo F_1 , F_2 , etc, las frecuencias de las señales portadoras), la regla de la intermodulación dice que los productos aparecerán en las frecuencias:

$$f = m_1 f_1 + m_2 f_2 + \dots + m_N f_N$$

Donde m_1, m_2, \dots, m_N son enteros positivos o negativos.

El entero:

$$m = |m_1| + |m_2| + \dots + |m_N|$$

Se conoce como orden del producto de intermodulación. Usualmente, cuando el ancho de banda en el que se opera es pequeño, comparada con la radiofrecuencia, solo los productos de orden impar caerán dentro del ancho de banda utilizado.

La potencia de los productos de intermodulación se decrementa con el orden, por lo que solo se llega a considerar los productos de tercer orden y, algunas veces, los de quinto orden. El número de los productos de intermodulación se incrementa muy rápido con el número de portadoras en la entrada.

Debido a estos productos, mientras más portadoras se quieran amplificar con el mismo dispositivo al mismo tiempo, será preciso operar en un punto cada vez más abajo del de saturación, y será menor la cantidad de potencia que se puede aprovechar a la salida.

5.1.3 Productos de intermodulación a la recepción

Estos son generados en la segunda etapa de mezclado del Transceptor, la siguiente fórmula se utiliza para calcular la frecuencia de estos productos:

$$F_{FI} = m f_{RF} \pm n f_{LO}$$

m y **n** son coeficientes enteros y la suma de ambos determinan el orden del producto de intermodulación.

Este tipo de intermodulación es generado por portadoras de alta densidad de potencia, y debido a esta particularidad los mezcladores de dos etapas en la sección de banda L a la recepción no pueden discriminar las armónicas que dicha portadora genera. Lo recomendable para evitar estos productos de intermodulación es utilizar transceptores de tres o más etapas, que permiten eliminar las señales armónicas.

5.2 Interferencias por Polarización Cruzada

Los sistemas de comunicación satelitales que utilizan el reuso de frecuencias empleando polarización ortogonal, ya sea lineal o circular tienen una fuente de interferencia originada como energía de acoplamiento desde un estado de polarización hacia otro estado de polarización ortogonal.

Por una parte se deben considerar la interferencia por polarización cruzada causada por una deficiente implementación de las antenas en las bases terrenas. El bajo aislamiento de las estaciones terrenas o VSAT es provocado por el inadecuado apuntamiento de la antena, el alimentador fuera del punto focal de la parábola, el mal diseño de la antena, deformaciones mecánicas en la parábola o en su estructura, así como un patrón de radiación fuera de las especificaciones técnicas. Por otro lado, existen factores no provocados que pueden afectar al sistema.

El uso de técnicas de reuso de frecuencias con polarización ortogonal, empleando tanto polarización lineal como circular en la transmisión, pueden verse afectadas de acuerdo a la ruta de propagación a través de la atmósfera terrestre, induciendo a una interferencia por polarización cruzada. Esto ocurre por la rotación de Faraday, y por las precipitaciones, ya sea por la lluvia o por cristales de hielo.

Como se vio anteriormente, la rotación de Faraday provoca una variación en la orientación del plano de polarización. Los picos de esta rotación pueden ser hasta de 9° a 4 GHz y 4° a 6 GHz. Si esta desviación es significativa de acuerdo a la frecuencia de operación, se deben rotar los planos de polarización (Las antenas, generalmente, tiene un polarizador) para disminuir los efectos en la antena de la estación terrena. Sin embargo se debe de considerar que los efectos de la rotación en la transmisión son contrarios en la recepción, por lo que se deben considerar los dos casos.

La despolarización inducida por la lluvia es causada por gotas de lluvia no esféricas, que producen una diferencia en la atenuación y un corrimiento en fase entre las componentes lineales de la señal que degrada la ortogonalidad entre las señales polarizadas. El corrimiento en fase es el factor que más afecta a la despolarización, sin embargo, a frecuencias mayores de 10 GHz, la diferencia en la atenuación se convierte en un factor de importancia debido a la pequeña longitud de onda que se tiene en altas frecuencias, con respecto a las dimensiones de las gotas de lluvia o cristales de hielo.

Para el caso de la banda C, el efecto de la lluvia es despreciable, por lo tanto la interferencia por polarización cruzada es determinada por la discriminación de las antenas de la estación terrena y el satélite. Esta discriminación está definida por la razón de la potencia recibida en la polarización principal y la potencia recibida en la polarización ortogonal en la misma señal incidente, y esto representa la razón portadora a interferencia de polarización cruzada donde las dos señales pola-

rizadas tienen la misma potencia. Las antenas de alta calidad pueden obtener esta razón de 30 a 40 dB, en la dirección de máxima radiación. La discriminación de la polarización cruzada neta de un enlace satelital es igual al efecto combinado de las antenas de una estación terrena y del satélite tanto para el enlace de subida como para el enlace de bajada. Siendo X_e y X_s los discriminadores de polarización cruzada para las antenas de la estación terrena y el satélite, respectivamente. Entonces se tiene que el mínimo discriminador de polarización cruzada neta en el enlace está dado por:

$$X_{min} = \frac{1}{2}(X_e^{-1} + X_s^{-1})^{-1}$$

Esta expresión representa el peor caso de la razón portadora a interferencia de polarización cruzada:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_X = X_{min}$$

La cual puede ser adicionada como fuente de interferencia para la obtención del $\left(\frac{C}{I}\right)_{total}$

5.3 Interferencia de Canales Adyacentes

Otra fuente de interferencias en un enlace satelital es la interferencia de canales adyacentes (o interferencia de transpondedores adyacentes) que aparece en satélites con canales de banda limitada.

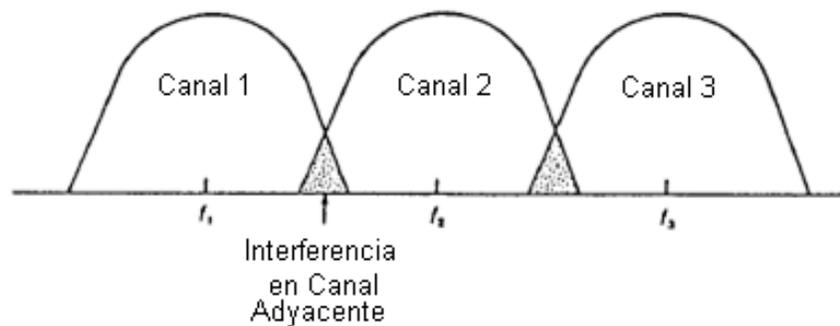


Figura 5-2: Interferencia en canales adyacentes.

La interferencia nace cuando cierta cantidad de la energía de una señal de banda limitada cae en canales adyacentes, debido al traslape de las características de amplitud de los filtros de canal. La situación es más grave en sistemas TDMA de un portadora por canal usando modulación QPSK, en estos casos, la estación terrena utiliza amplificadores de alta potencia y los satélites, por lo general, utilizan amplificadores TWT operando cerca o en el punto de saturación. Las características de no linealidad de estos amplificadores de potencia generan lóbulos laterales durante el filtrado los cuales provocan la interferencia en canales adyacentes. Este fenómeno se conoce como espectro disperso. El grado de dispersión varía de acuerdo al punto de operación del amplificador de potencia. El espectro disperso de un amplificador de potencia en la estación terrena determina la magnitud de la interferencia en canales adyacentes en el enlace de subida, por lo que puede ser reducido modificando el punto de operación. Por otro lado, los amplificadores TWT en los satélites, son los causantes de la interferencia en canales adyacentes en el enlace de bajada, ésta puede ser controlada utilizando un multiplexaje que no permita el paso de la señal fuera de banda.

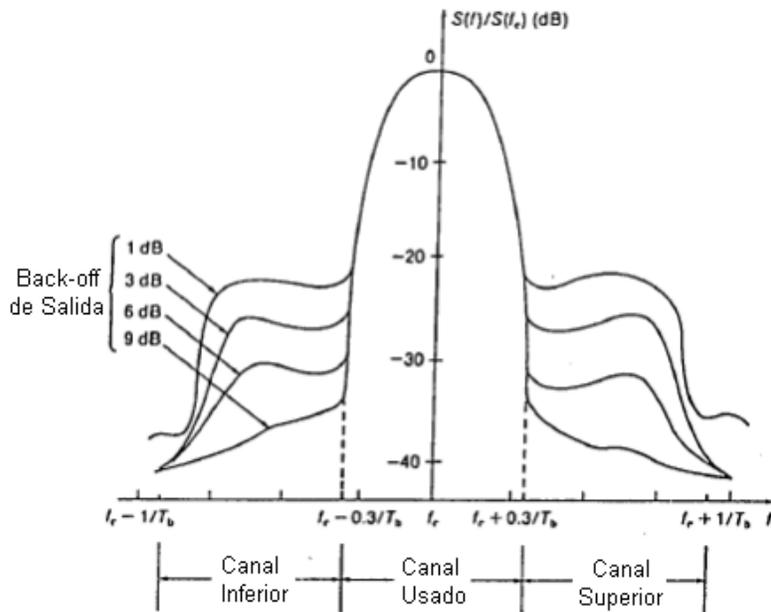


Figura 5-3: Espectro disperso debido a la no linealidad del amplificador de alta potencia.

La relación portadora a interferencia en canales adyacentes (en dos canales adyacentes idénticos) para el enlace de subida está dada por:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_s = \frac{\int_{f_c-B/2}^{f_c+B/2} S_s(f)df}{4 \int_{f_c-B/2}^{f_c-\Delta/2} S_s(f)df}$$

Donde $S_s(f)$ = densidad espectral de potencia de una portadora QPSK a la salida de un amplificador de alta potencia de una estación terrena (W/Hz) y Δ = separación en frecuencia de las portadoras adyacentes (Hz).

Para el caso de la relación portadora a interferencia en canales adyacentes para el enlace de bajada está dada por:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_b = \frac{\int_{f_c-B/2}^{f_c+B/2} S_b(f)|H(f)|^2df}{4 \int_{f_c-B/2}^{f_c-\Delta/2} S_b(f)|H(f)|^2df}$$

Donde $S_b(f)$ = es la densidad espectral de potencia de una portadora QPSK a la salida del amplificador TWT en el satélite (W/Hz) y $H(f)$ = respuesta en amplitud del multiplexor de salida del satélite.

Estas ecuaciones pueden ser utilizadas como interferencias adicionales para el cálculo de la $\left(\frac{C}{I}\right)_{total}$. El punto de operación de un amplificador de alta potencia de 2 a 6 dB es necesario para tener una relación de portadora a interferencia de canal adyacente mayor a 25 dB.

5.4 Procesos que pueden generar interferencia durante la transmisión en el enlace ascendente

5.4.1 Ruido de fase

Cuando se transmite una sola portadora, el trabajar en estados no lineales puede provocar lo que se conoce como ruido de fase. Se llama ruido de fase de una señal periódica a las variaciones aleatorias de su fase instantánea con respecto a la de una señal ideal. Otra causa de este efecto son las variaciones que existen en las fuentes de alimentación de voltaje

Se mide de dos maneras:

- Relación de la densidad de potencia del ruido alrededor de la frecuencia central con respecto a la potencia de la señal, expresada en decibeles-portadora por Hertz [dBc/Hz].
- Desviación estándar del período de la señal, expresada en segundos [s]

5.4.2 Conversiones AM/AM

Las conversiones de “modulación en amplitud a modulación en amplitud”, son distorsiones en amplificadores de microondas, generadas por los cambios de la salida del voltaje de RF. Se determinan comparando la distorsión en la salida con la amplitud en la entrada (Figura 5-4).

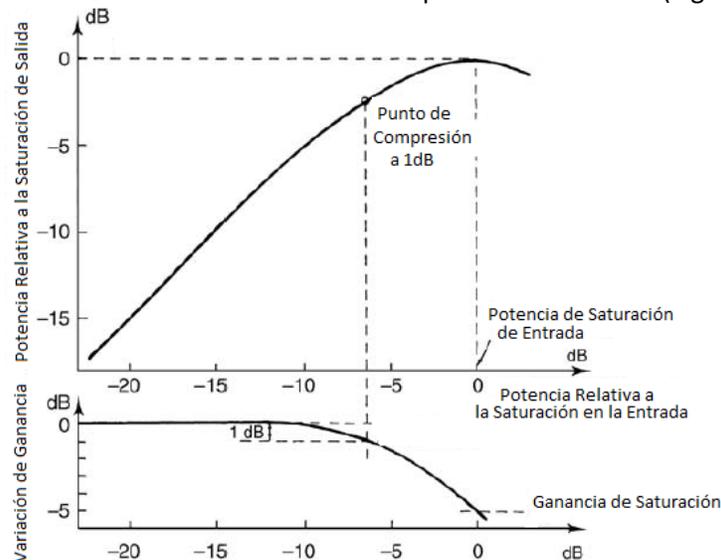


Figura 5-4: Variaciones de la amplitud en la salida y su relación con la variación en la ganancia.

5.4.3 Conversiones AM/PM

Las conversiones de “modulación en amplitud a modulación en fase” son distorsiones en microondas debido al cambio en el ángulo de la fase del voltaje de RF entre la señal de entrada y la señal de salida (Figura 5-5). Este efecto es particularmente dañino en el caso de transmisiones digitales donde la información es generalmente contenida en portadoras con modulación en fase.

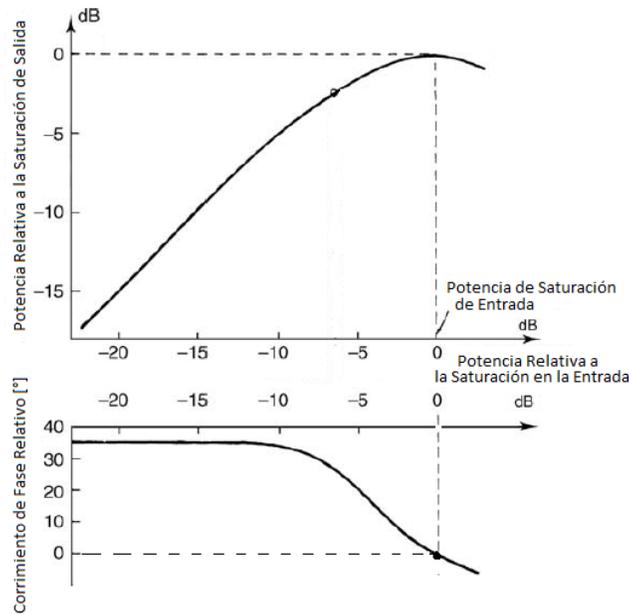


Figura 5-5: Variaciones de la fase en la salida debido a la variación de la amplitud en la entrada.

5.4.4 Señal de tipo Barrido

El desmarraje de fase en el oscilador local de un modem satelital, un excitador de video, un convertidor de frecuencia o un amplificador de potencia, además de variaciones de temperatura o bien la mala calidad de los componentes electrónicos puede provocar señales de barrido. Por lo que es importante verificar con frecuencia la correcta operación del oscilador en fase.

También se puede dar el caso de múltiples barridos, esto provocado por la falla de algún equipo que se encuentra oscilando internamente en la cadena ascendente, sin embargo, a nivel satelital, solo algunos barridos se pueden observar.

5.4.5 Ruido generado en un amplificador Klystron

Este tipo de interferencia se presenta en estaciones que utilizan amplificadores de potencia de tipo Klystron de varias cavidades (Figura 5-6), operando en una cavidad incorrecta, lo que genera levantamiento del piso de ruido en los costados de la portadora.

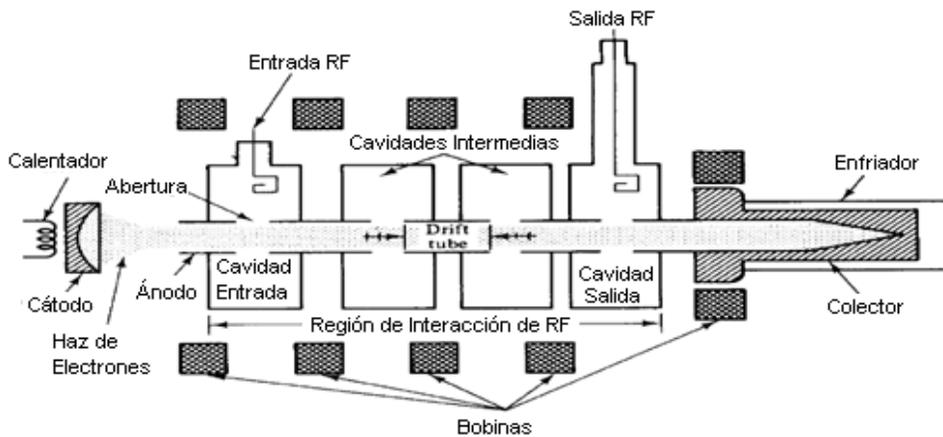


Figura 5-6: Amplificador Klystron de múltiples cavidades.

Este efecto puede llegar a confundirse con una intermodulación, sin embargo la diferencia reside en que el levantamiento del piso de ruido es asimétrico, en comparación con una intermodulación, en la que el levantamiento sería simétrico respecto a la portadora.

5.5 Interferencias Intencionales

Las interferencias intencionales son raras y por lo general muy notorias. En muchos países, sobre todo del primer mundo, el ocasionar intencionalmente una interferencia de radio frecuencia dañina se considera como crimen. Esta medida ha ayudado a disminuir los casos de este tipo.

Estos casos se deben a que la comunicación satelital, a diferencia de aquella que para su propagación utiliza medios de transmisión de ondas guiadas (cable coaxial, fibra óptica, guías de onda, etc.), utiliza el aire como la forma en que se propaga (ondas no guiadas), lo que provoca una mayor vulnerabilidad, ya que cualquier transmisor en tierra que se encuentre dentro de la zona de cobertura del satélite (huella) puede ser una fuente de interferencia, siempre y cuando esa zona cuente con suficiente PIRE. Muchos de los recursos de los centros de control satelital consisten en el monitoreo constante de todos los transpondedores en el enlace de bajada, así la interferencia puede ser observada tan pronto como aparece. Este proceso puede mejorar si se tiene una buena comunicación directa con los usuarios que tiene asignada parte de la capacidad del satélite, ya que ellos pueden detectar una interferencia en su transmisión, y ya sea por correo electrónico o mejor aún llamando al centro de control, reportan la afectación de sus servicios, con lo que la gente encargada de controlar el satélite puede analizar si la interferencia es provocada por el mismo sistema del usuario o bien si es ajeno a éste. Por lo tanto, la clave para controlar y eliminar interferencias dañinas es mantener este tipo de vigilancia en el sistema.

Las interferencias intencionales son una fuente de ansiedad para operadores y usuarios del satélite. Siempre hay la posibilidad de que un “radio-pirata” tome el control de una estación terrena o bien, construya una con el propósito de causar algún tipo de abuso. En los raros casos cuando esto pasa, el perpetrador es identificado y perseguido. Esto puede ser provocado por personas con problemas emocionales y conlleva a conflictos en donde la policía u otras autoridades tienen que intervenir. En la actualidad, no existe una fuerza policial encargada de estos casos; en el ámbito internacional, la UIT se encarga de proveer reglas para poder normalizar los sistemas tratando de evitar interferencias accidentales, pero en cuestión de las interferencias intencionales, lo único que queda es tomar medidas de prevención y protección de la información que viaja en la red satelital para prevenir futuros episodios. Para el caso de problemas de interferencias con sistemas de distintos países, la resolución debe ser llevada por un proceso diplomático entre las administraciones, cuestiones más allá de la parte técnica que se aborda en este trabajo.

5.5.1 Casos de Sabotaje

Otro tipo de interrupción intencional es de tipo “físico”, al que le llamamos sabotaje. Siendo que los satélites son controlados desde tierra, pueden llegar a suceder casos de vandalismo en estaciones terrenas. Cualquier estación terrena de alta potencia utilizada para enlaces ascendentes de TV puede ser usada para sabotear y/o tomar control de la transmisión, teniendo el apropiado equipo decodificador. Por ello las nuevas generaciones de satélites comerciales tienen como uno de sus objetivos de diseño, desarrollar sistemas de comandos de seguridad que puedan prevenir la remota posibilidad de casos de sabotaje.

La mayoría de las estaciones terrenas que son capaces de causar un sabotaje al satélite están protegidas con parámetros de seguridad. La complejidad de la seguridad física, dependerá del riesgo. Instalaciones en áreas remotas pueden tener menor seguridad, debido a su difícil acceso.

Las instalaciones de control satelital que utilizan los gobiernos como servicio de comunicación deben estar totalmente protegidas. Este es un caso especial que debe ser tratado con más cuidado que aquellos casos de tipo comercial, ya que cualquier ataque podría representar un problema de seguridad nacional.

5.6 Fuentes de interferencia que surgen en la operación del sistema o que surgen de otros sistemas de comunicación no satelitales

5.6.1 Inducción de señales

Este efecto consiste en pares de inducción de campo electromagnéticos provocados por el mal estado o la mala colocación de cables y conectores en cualquier parte de los sistemas de comunicación. En el caso de los sistemas satelitales, estas interferencias se pueden dar en la estación terrena o en la estación espacial teniendo, de acuerdo al servicio y al tipo de estación, entre los efectos de inducción que se pueden presentar se tienen:

- Inducción de señales de Radiodifusión en FM
- Inducción satelital
- Inducción de Microondas
- Inducción de Subportadoras de audio
- Inducción de audio y luminancia de la señal de TV
- Inducción de audio de VHF

5.6.2 Por espurias

Hay pequeñas espurias generadas, ya sea por los diversos subsistemas que integran al satélite o por causas desconocidas. La característica típica de una señal espuria de baja amplitud, radica en presentar un ancho de banda de no más de 50 kHz y una relación C/N de no más de 5dBc.

Las señales espurias son generalmente pequeñas y pueden no ser armónicas respecto a la fundamental, dificultando su localización. Su origen es muchas veces desconocido y es un problema que se presenta comúnmente en las transmisiones satelitales.

5.6.3 Fallas en la coordinación

Cuando se suben señales al satélite sin la autorización y supervisión de personal de monitoreo y sin la coordinación de sus áreas involucradas, así como una mala operación o desconocimiento del uso del equipo en el caso de la transmisión en frecuencias erróneas.

Este suele ser un problema común cuando se tienen transpondedores con multiportadoras, lo que provoca que varios clientes operen muy cerca uno de otro. Los parámetros de transmisión deben ser cuidadosamente configurados para evitar interferir portadoras vecinas y de transpondedores en polarizaciones cruzadas, siendo el caso de utilizar reuso de frecuencias.

5.6.4 Interferencia de Radio-Altímetros

Los radio-altímetros son equipos de navegación instalados a bordo de una aeronave o de un vehículo espacial, que permiten determinar la altura a que se encuentran estos sobre la superficie de la Tierra u otra superficie. Su funcionamiento está basado en una onda de radar que se emite hacia abajo y vuelve reflejada al instrumento, cuyo procesador mide el tiempo transcurrido y, por consiguiente, la distancia recorrida por la onda de radio. Estos operan en la banda C, en el rango de 4200 a 4400 MHz, y provocan afectaciones de manera local. Por lo que se requiere poner filtros supresores de frecuencias que no permitan pasar señales mayores a 4200 MHz.

Otra medida de prevención consiste en tener los centros de control satelital o los telepuertos en zonas lejanas a aeropuertos o evitar estar en medio de rutas de aeronaves comerciales, esto para evitar afectaciones transitorias en la comunicación de banda C.

5.6.5 Interferencia Solar

El ruido cósmico, es decir la temperatura de ruido de la antena debido a las fuentes radioeléctricas extraterrenales puede aumentar si una fuente radioeléctrica intensa cae dentro del haz principal de la antena. Las fuentes extraterrenales de ruido más importantes son el Sol y la Luna.

Al cruzar el Sol o al estar muy próximo a cruzar el eje de la antena de alta ganancia de una estación terrena impide su comunicación con el satélite, debido a que la temperatura de ruido sobrepasa rápidamente un nivel tolerable alcanzado hasta 20 000 [K] o más. Las antenas de muy baja ganancia no sufren este efecto, debido a que el Sol no les produce una temperatura de ruido suficientemente alta. Aún cuando la dirección del Sol es independiente de cualquier órbita satelital, el apuntamiento de la antena y por tanto las condiciones que provoca la interferencia depende de la posición en que se encuentre el satélite en la trayectoria de su órbita.

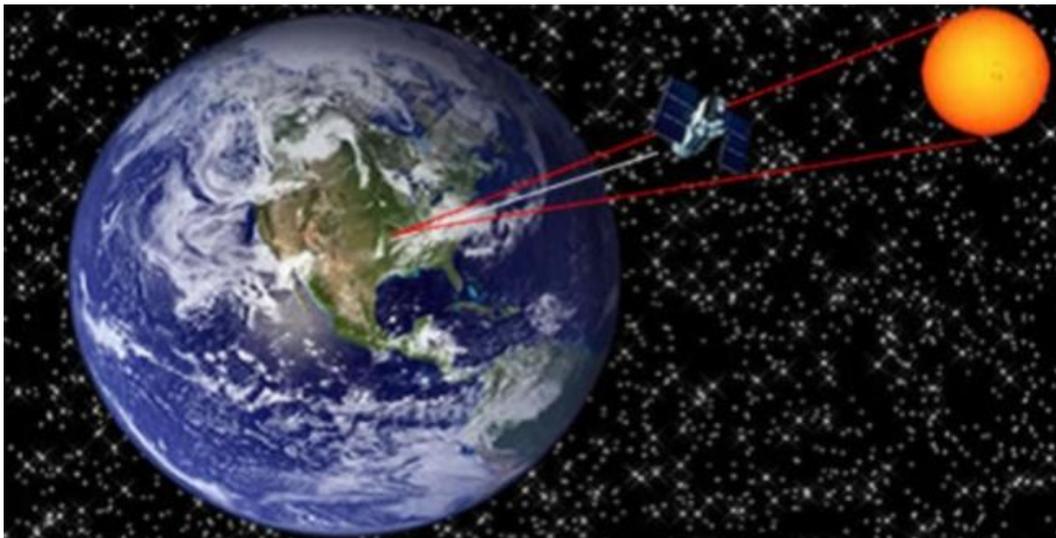


Figura 5-7: Caso de Interferencia Solar.

La mayor afectación sucede durante el equinoccio de primavera y después del equinoccio de otoño si la estación terrena está en el Hemisferio Norte, y después del equinoccio de primavera y antes del equinoccio de otoño si la estación está en el Hemisferio Sur.