

INFORME 760-2

BALANCES DE POTENCIA DE ENLACE PARA EL SERVICIO MÓVIL MARÍTIMO POR SATÉLITE

(Cuestión 87/8)

(1978-1982-1990)

1. Introducción

Tiene este Informe dos finalidades fundamentales:

- enumerar los parámetros que hay que tener en cuenta al hacer los balances de potencia en los enlaces para un sistema futuro del servicio móvil marítimo por satélite, y las condiciones en que se aplican esos parámetros, y
- presentar ejemplos de balances de potencia en enlaces para ilustrar la aplicación de dichos parámetros.

Se necesitan balances de potencia en los enlaces para determinar las necesidades probables de potencia y las características físicas del sector espacial (satélite) y del sector terreno (estaciones terrenas costeras y estaciones terrenas de barco). El diseño general de los sistemas futuros tendrá que basarse en gran medida en la experiencia adquirida durante la realización y la explotación de los sistemas marítimos por satélite existentes y proyectados, por lo cual los sistemas INMARSAT y MARISAT [INMARSAT, 1978; MARISAT, 1977] constituirán una guía útil para la elección de los parámetros adecuados para los balances de potencia.

Los ejemplos de balance de enlace que se indican en el presente Informe se refieren a sistemas analógicos con cobertura global mediante sistemas de satélite con haz conformado. Las normas de servicio móvil aplicadas se han tomado del sistema analógico INMARSAT - norma A. En el Informe 921-2 se expone un ejemplo de balances de enlace para sistemas digitales.

2. Principios fundamentales de los balances de potencia

El principio fundamental adoptado en este Informe es la hipótesis de un sistema de «referencia» de cuya configuración se podrán deducir los parámetros correspondientes a otras configuraciones. En lo que concierne a la propagación, la calidad de los canales obtenidos con un sistema marítimo por satélite dependerá grandemente del ángulo de elevación del satélite y, por ello, parece razonable adoptar el ángulo de elevación como uno de los parámetros en que se ha de basar el sistema de referencia. Se supone aquí que la configuración de referencia para los balances de potencia se aplica a ángulos de elevación del satélite de 5° para las estaciones terrenas costeras y 10° para las estaciones terrenas de barco. Luego se podrán deducir los parámetros correspondientes y las calidades de canal resultantes con otros ángulos de elevación.

Otro criterio aquí adoptado es el supuesto de que los parámetros para el sector terreno son los mismos que en los sistemas existentes o proyectados; en particular, se supone que las estaciones terrenas de barco se ajustan a la norma A de INMARSAT.

3. Parámetros de los canales de telefonía

Se cree que la telefonía será el servicio predominante en lo que a necesidades de potencia del sistema se refiere, y los balances de potencia se han basado, en consecuencia, en un canal de telefonía.

Para presentar como referencia ejemplos de balances de enlaces, se ha partido del supuesto que debiera conseguirse una relación C/N_0 total de 53 dBHz en los dos sentidos de transmisión, por lo menos durante el 80% del tiempo, con ángulos de elevación en dirección del satélite de 5° en las estaciones terrenas costeras y de 10° en las estaciones terrenas de barco y sin desvanecimiento por trayectos múltiples en los enlaces barco-satélite. Este objetivo se ha utilizado en la configuración de referencia para los balances de potencia, como se ve en la última columna de la derecha en los cuadros I y II. El objetivo actual de calidad de los canales de telefonía recomendado por el CCIR para el servicio móvil marítimo por satélite corresponde a una relación global C/N_0 de 52 a 53 dBHz aproximadamente (véanse la Recomendación 547 y el Informe 752) [INMARSAT, 1978].

Además de la configuración de referencia, en los cuadros I y II se muestran ejemplos de balances de potencia para ángulos de elevación de las antenas del barco de 5° y 10° , cuando se producen desvanecimientos por trayectos múltiples en los enlaces barco-satélite. Se supone que los parámetros de desvanecimiento son aplicables a condiciones que duran por lo menos el 99% del tiempo. Sin embargo, no se dispone de datos experimentales suficientes para establecer de manera fiable los márgenes de desvanecimiento requeridos para cualquier nivel de confianza.

Se prevé para la telefonía la explotación en el modo de un solo canal por portadora (SCPC) con acceso múltiple por distribución de frecuencia, con modulación de frecuencia de banda estrecha y tratamiento de la señal vocal (por ejemplo, compresión-expansión silábica 2 : 1). Con una relación C/N_0 de 53 dBHz a la entrada del demodulador, la anchura de banda de ruido adecuada en el receptor sería de 30 kHz con 50 kHz de separación entre canales; la relación C/N correspondiente sería de unos 8 dB.

Se necesitarían demoduladores de extensión de umbral, con un umbral nominal de unos 50 dBHz, para obtener una degradación aceptable de la calidad de la palabra con un nivel de señal reducido.

4. Parámetros del sector espacial

La configuración del sector espacial aquí supuesta está basada en una cobertura mundial en las dos direcciones de transmisión: costera-barco y barco-costera. A continuación se resumen los supuestos relativos a las características de la antena para 1,5/1,6 GHz y del ruido de intermodulación en los traspondedores.

4.1 Antena para 1.5/1.6 GHz

El trayecto de transmisión crítico con respecto a las necesidades de potencia del satélite, es la dirección satélite-barco, en 1,5 GHz. Se puede aprovechar bien la potencia disponible en el satélite para la cobertura global de la Tierra con una antena de haz conformado [Wood y Boswell, 1974; Lancrenon y otros, 1976]. Una solución de compromiso entre la ganancia de esta antena en el centro y en los bordes del haz, proporciona una densidad de flujo recibido casi constante en la superficie de la Tierra con todos los ángulos de elevación, lo que optimiza la calidad de funcionamiento del sistema con las estaciones terrenas de barco que se encuentran en los límites de la zona de servicio donde los efectos de propagación son los más graves. Puede obtenerse también una compensación semejante en el trayecto ascendente en 1,6 GHz.

4.2 Comportamiento respecto al ruido de intermodulación

En el cuadro I, la relación C/I_0 (portadora/densidad de ruido de intermodulación) del amplificador del satélite para el enlace costera-barco se muestra como un factor limitador para determinar la C/N_0 resultante y, por tanto, debe optimizarse con respecto a la potencia de salida del amplificador. Con amplificadores típicos y planes de frecuencia adecuados que minimicen el ruido de intermodulación en los canales ocupados, se puede obtener razonablemente un valor de C/I de unos 19 dB en una anchura de banda de 30 kHz con carga considerable en el amplificador del satélite. Esto da como resultado el valor supuesto de C/I_0 de 63,8 dBHz para el sentido costera-barco.

Como se indica en el cuadro II, en el sentido barco-costera, se ha supuesto un valor de C/I_0 de 70 dBHz, pues no se prevé que el amplificador del satélite esté tan limitado en potencia como en el sentido costera-barco.

5. Parámetros del sector terreno

Se han adoptado como base para los balances de potencia, las siguientes características RF de la estación terrena de barco y la estación terrena costera:

G/T de la estación terrena de barco: $-4 \text{ dB(K}^{-1}\text{)}$ (norma A);

p.i.r.e. de la estación terrena de barco: 37 dBW;

G/T de la estación terrena costera: $32 \text{ dB(K}^{-1}\text{)}$;

p.i.r.e. de la estación terrena costera: 60 dBW.

5.1 Estación terrena de barco

El valor G/T de $-4 \text{ dB(K}^{-1}\text{)}$ supuesto es un valor neto que comprende márgenes para las pérdidas de potencia debidas a la imprecisión de puntería, al alineamiento defectuoso de las elipses de polarización, al diplexor y a un radomo seco; en los presupuestos de enlace se deja un margen adicional para la pérdida debida al radomo cuando está húmedo. Se puede lograr esa sensibilidad con una ganancia de antena de 23 dBi y un amplificador transistorizado en el receptor de una temperatura de ruido total del sistema de 500 K. La antena apropiada sería un paraboloide de 1,2 m de diámetro, con un rendimiento de iluminación del 60% y una anchura de haz aproximada de 10° en los puntos a -3 dB ; se ha supuesto una relación axial de unos 2 dB. Para los cálculos de los balances de potencia del enlace se han considerado separadamente las pérdidas debidas a la puntería y a la polarización.

No se ha previsto ningún margen en los balances de potencia para los efectos de bloqueo debido a la superestructura de los barcos, que dependerán del barco que sea y que teóricamente pueden eliminarse eligiendo una ubicación sin obstrucciones.

5.2 Estación terrena costera

Para un G/T con cielo despejado de 32 dB(K⁻¹) a 5° de elevación, se ha supuesto una temperatura de ruido total del sistema de 100 K con cielo despejado, para calcular la degradación de la temperatura de ruido en condiciones de desvanecimiento. Se supone que los parámetros de desvanecimiento, para enlaces de 4/6 GHz, son aplicables a las condiciones de propagación que duran el 99,99% del tiempo: así pues, la calidad de canal de los enlaces totales entre estaciones terrenas costeras y estaciones terrenas de barco, se determina principalmente por los parámetros de atenuación en los enlaces barco-satélite en 1,5/1,6 GHz.

Un diámetro apropiado de la antena de la estación terrena costera sería de 13 m, suponiendo un rendimiento de iluminación del 60%. Se ha supuesto que la relación axial de la antena es de 0,5 dB; a los efectos de calcular los balances del enlace, se han examinado por separado las pérdidas de polarización y de puntería.

Se ha supuesto que el ruido de intermodulación del enlace ascendente procedente de todos los amplificadores de transmisión de las estaciones terrenas costeras dé como resultado una relación C/I total del enlace ascendente superior a 30 dB en una anchura de banda de 30 kHz. Esta hipótesis concuerda con el actual Documento de Características Técnicas de Estaciones Terrenas Costeras de INMARSAT y la calidad de funcionamiento prevista en los planes de frecuencia típicos que podrían emplearse. Esto da el valor de la relación C/I_0 de 75 dBHz utilizado en el cuadro I.

6. Cálculo de los márgenes para los enlaces

Los márgenes necesarios para conseguir los objetivos de calidad deseados en los enlaces por satélite dependen de numerosos factores que comprenden las características del satélite y de las estaciones terrenas de barco y de las estaciones terrenas costeras, la situación meteorológica, el estado del mar y los ángulos de elevación del satélite. Al diseñar el sistema se deben incluir márgenes para los enlaces en armonía con los siguientes factores:

- ángulo mínimo de elevación considerado para el servicio;
- degradación de calidad tolerable con ángulos de elevación inferiores al punto mínimo previsto en el diseño.

La elección de márgenes para los enlaces en relación con el ángulo de elevación (α) y el diseño del sistema, influirá en el comportamiento de la totalidad del sistema (como ocurre en la red terrenal). Un sistema diseñado para una calidad determinada durante cierto porcentaje de tiempo, con márgenes para las degradaciones que ocurren para ángulos de elevación pequeños, alcanzará esa calidad durante porcentajes de tiempo mucho mayores en el caso de las llamadas dirigidas a todos los barcos o provenientes de ellos dentro de la zona de servicio.

Los márgenes requeridos para compensar pérdidas distintas de las pérdidas básicas del trayecto en el espacio libre, se pueden agrupar en las categorías de pérdidas de larga duración (fijas y aleatorias) y de corta duración.

6.1 Pérdidas de larga duración

Son pérdidas de larga duración las que tienen tendencia a durar un minuto, como mínimo, cada vez que ocurren.

6.1.1 Pérdidas fijas de larga duración

Las pérdidas de larga duración que ocurren con seguridad deberían incluirse en la pérdida del trayecto para todos los cálculos. El margen completo para esas pérdidas, en dB, es la suma de ellas; por ejemplo:

$$L_f = \sum_j L_{f,j} \quad (1)$$

6.1.2 Pérdidas aleatorias de larga duración

Hay varias pérdidas de larga duración que tienden a ocurrir aleatoriamente y que, por lo general, son independientes las unas de las otras. Se puede obtener la pérdida media (\bar{L}_l) y la varianza (σ_l^2) acumulativas, sumando las medias y varianzas individuales.

$$\bar{L}_l = \sum_j \bar{L}_{l,j}; \quad \sigma_l^2 = \sum_j \sigma_{l,j}^2 \quad (2,3)$$

6.2 Pérdidas de corta duración

Se pueden definir las pérdidas de corta duración diciendo que son aquellas que tienden a durar, cada vez que ocurren, menos de un minuto. Como un periodo importante de desvanecimiento de corta duración puede ser raro e incierto o puede ocurrir sólo a determinadas horas del día, al fijar los márgenes contra el desvanecimiento es preciso consultar estadísticas de desvanecimiento.

Las pérdidas de corta duración tienden a ser independientes entre sí y a tener distribuciones estadísticas distintas. Los márgenes acumulativos necesarios para esas pérdidas pueden depender grandemente del ángulo de elevación (α) porque las pérdidas independientes del ángulo de elevación son relativamente pequeñas o raramente ocurren.

Los valores medios acumulativos de la pérdida (\bar{L}_s) y de la varianza (σ_s^2) de las pérdidas acumulativas de corta duración se puede obtener sumando las pérdidas y las varianzas medias individuales.

$$\bar{L}_s = \sum_i \bar{L}_{s,i}; \quad \sigma_s^2 = \sum_i \sigma_{s,i}^2 \quad (4, 5)$$

6.3 Márgenes acumulativos para todas las pérdidas

Como las pérdidas de larga y de corta duración son razonablemente numerosas e independientes, las necesidades totales de margen se pueden evaluar aproximadamente mediante una distribución de pérdidas normal cuya media vendrá dada por la siguiente fórmula:

$$L \approx L_f + \bar{L}_l + \bar{L}_s \quad \text{dB} \quad (6)$$

y su desviación típica sería:

$$\sigma \approx (\sigma_f^2 + \sigma_s^2)^{1/2} \quad \text{dB} \quad (7)$$

En tal caso, el margen acumulativo apropiado en dB correspondiente a porcentajes de tiempo del 80%, 99% y 99,99% sería:

$$\begin{aligned} M(80\%) &= L + 0,85 \sigma \\ M(99\%) &= L + 2,33 \sigma \\ M(99,99\%) &= L + 3,72 \sigma \end{aligned} \quad (8)$$

7. Márgenes en las bandas de frecuencia en 1,5/1,6 GHz para los enlaces barco-satélite

7.1 Pérdidas de larga duración

Las pérdidas de larga duración para las cuales se pueden necesitar márgenes son las siguientes:

$L_a(\alpha)$: absorción atmosférica, en dB; es función del ángulo de elevación barco-satélite (α); aquí se ha sacado del Informe 714;

$L_e(\alpha)$: exceso de atenuación, en dB, rebasado durante no más del 20% o del 1% del tiempo; se considera despreciable en 1,5/1,6 GHz;

L_r : pérdida debida al radomo (si lo hay), en dB; las pérdidas debidas a un radomo seco (0,2 dB) pueden estar ya compensadas en la definición de la ganancia de la antena de la estación terrena de barco y en la sensibilidad del receptor (G/T), como aquí se supone;

L_p : pérdida de acoplamiento de polarización, en dB; es función de las relaciones axiales de las antenas de la estación terrena de barco y del satélite (2 dB y 3 dB, respectivamente); el caso más desfavorable es el de elipses de polarización no alineadas;

L_b : pérdidas de bloqueo en la estructura del barco, en dB; son función de la situación de la antena, de las dimensiones y de la forma de la obstrucción, de la dirección y de la anchura del haz de la antena del barco.

Hay otras degradaciones causadas por un aumento de la temperatura de ruido del sistema originado por diversas pérdidas, a saber:

DT_r : relación, en dB, entre la temperatura de ruido del sistema cuando tiene radomo, y la temperatura de ruido del sistema sin radomo; esto puede estar ya compensado en el valor G/T , como aquí se ha supuesto, pero se requiere cierto margen para la degradación de la temperatura de ruido debida al radomo húmedo;

ΔT_a : incremento de temperatura ocasionado por la absorción atmosférica; se considera despreciable con una temperatura de ruido del sistema de 500 K.

7.1.1 Pérdidas fijas de larga duración

El margen total para las pérdidas fijas de larga duración viene dado por:

$$L_f(\alpha) = L_a(\alpha) + L_r(\text{seco}) \quad (9)$$

7.1.2 Pérdidas aleatorias de larga duración

En las estadísticas acumulativas de las pérdidas aleatorias de larga duración, entrarían, por ejemplo, L_p , y L_r (húmedo); podrían ser representativas las siguientes pérdidas medias y desviaciones típicas de estos factores de pérdida:

| Factor de pérdida | Pérdida media (dB) | Desviación típica (dB) |
|-------------------|--------------------|---|
| L_p | 0,2 | 0,09 |
| L_r (húmedo) | 0,2 | 0,13 |
| DT_r (húmedo) | 0,1 | 0,09 (Temperatura de ruido de referencia = 500 K) |

La inclusión de la pérdida de bloqueo (L_b) en los cálculos del margen puede no ser compatible con los objetivos prácticos y operacionales de la instalación de las estaciones terrenas de los barcos. Lo normal puede ser instalar la antena del barco completamente libre de obstáculos para ángulos de elevación superiores al mínimo de diseño del sistema, en lugar de fijar un amplio margen de sistema para el bloqueo como se ha hecho aquí.

7.2 Pérdidas de corta duración

Son pérdidas de corta duración para las cuales se pueden necesitar márgenes, las siguientes:

- L_t : fluctuaciones del nivel de potencia del transmisor de la estación terrena del barco, que aquí se suponen de $\pm 0,5$ dB durante el 95% del tiempo aproximadamente y corresponden a una pérdida media de 0 dB y a una desviación típica de 0,25 dB;
- ΔG : pérdidas debidas a la puntería de la antena de la estación terrena del barco, en dB; es función de la calidad de funcionamiento del sistema de puntería de la antena del barco, que tiende a empeorar con mar gruesa, algunos tipos pueden presentar grandes errores de seguimiento en determinadas direcciones, como la del cenit;
- L_i : pérdidas de desvanecimiento ionosférico, en dB, consecuencia del centelleo; son función de la situación del barco, de la estación del año y de la hora del día;
- $L_m(\alpha)$: pérdidas debidas a la propagación por trayectos múltiples, en dB, a causa de reflexiones en el mar y en la estructura del barco; la magnitud de la pérdida para un porcentaje de tiempo determinado y su rapidez de variación, dependen del estado del mar, del ángulo de elevación (α), de la polarización del enlace, del diagrama de radiación de la antena del barco, de la relación axial de la antena del barco en la dirección de la zona de reflexiones, de la altura de la antena sobre el nivel del mar y de la precisión del sistema de puntería de la antena.

7.2.1 Pérdidas debidas a la puntería de la antena

Las pérdidas debidas a la puntería de la antena (ΔG) pueden ser pequeñas, sobre todo cuando las antenas de las estaciones terrenas de los barcos están provistas de equipo de puntería automática. Los errores corrientes de puntería pueden estar normalmente distribuidos con una desviación típica de un 0,1 de la anchura de haz o menos en las peores condiciones previstas en el diseño, y la distribución de la pérdida correspondiente sería «chi-cuadrado». Para mayor sencillez se ha supuesto una pérdida de 0,5 dB durante el 99%, con un valor medio de 0,3 dB y una desviación típica de 0,09 dB.

7.2.2 Pérdida de centelleo ionosférico

Las pérdidas de desvanecimiento en la banda 9 como consecuencia del centelleo ionosférico tienden a ser apreciables en los equinoccios de primavera y otoño, principalmente en las cercanías del ecuador geomagnético y en las altas latitudes geomagnéticas [Canadá, 1973; Golden y Sessions, 1972]. Además, el desvanecimiento cerca del ecuador geomagnético tiende a ser más grave que en las altas latitudes geomagnéticas, y su duración varía entre una y tres horas aproximadamente, ocurriendo poco después del ocaso local. Las mediciones muestran que las pérdidas máximas suelen ser del orden de 3 a 5 dB por debajo del valor en espacio libre, durante los días de peores desvanecimientos y que los desvanecimientos más profundos duran, por lo general, menos de 15 s. Durante los periodos de desvanecimiento se espera que no se rebasará una pérdida de 1,1 dB aproximadamente más del 1% de las horas, y que no se rebasará una pérdida de 1,8 dB más del 0,1% de las horas [Golden y Sessions, 1972]. Una estimación prudente de la desviación típica correspondiente la valoraría en 0,6 dB.

La inclusión de la pérdida de centelleo ionosférico en el margen acumulativo proporcionaría estadísticas con respecto al caso más desfavorable, que serían aplicables durante un tiempo muy corto en unos pocos días del año y a posiciones geográficas limitadas. Para algunos sistemas puede tratarse de la pérdida de corta duración determinante, por lo que debe tenerse en cuenta al seleccionar los márgenes para la «peor hora», pero no se la incluye a los fines del presente Informe.

7.2.3 Pérdidas debidas a trayectos múltiples

Según las estadísticas, las pérdidas del desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples dependen en gran manera del ángulo de elevación y podrían ser el factor predominante en el margen necesario para el enlace. Se ha realizado una serie considerable de estudios y experimentos para evaluar los efectos del desvanecimiento debido al fenómeno de los trayectos múltiples. Véanse los Informes 505 (Kyoto, 1978), 599 y 763 [CERS, 1974; OCMI, 1973; ESA, 1976].

En condiciones normales del mar en la mayor parte de las zonas oceánicas, las reflexiones debidas a trayectos múltiples en la superficie del mar, serán predominantemente difusas y la señal indirecta compuesta tendrá características estadísticas gaussianas de banda estrecha. A diferencia del ruido del receptor de la estación terrena del barco, la relación entre la portadora y la interferencia por trayectos múltiples (C/I_{mp}) en la recepción no se reducirá aumentando la potencia del transmisor del satélite. Por consiguiente, los márgenes previstos para la interferencia difusa por trayectos múltiples no sirven para aumentar la relación C/I_{mp} , sino únicamente para obtener una relación portadora/ruido térmico del receptor suficiente para mantener aceptable el comportamiento del receptor de la estación terrena del barco cuando se produce el desvanecimiento por trayectos múltiples.

Una vez determinado el valor esperado de la C/I_{mp} para el ángulo mínimo de elevación previsto en el diseño, se pueden calcular las profundidades de desvanecimiento que no se rebasarán más de un $p\%$ del tiempo. Por ejemplo, una extrapolación de datos experimentales medidos muestra que una antena directiva con una ganancia nominal de 24 dBi en el centro del haz (anchura de haz 10°) en un enlace de polarización circular y con un ángulo de elevación de 5° , tendría normalmente una $C/I_{mp} \approx$ de 16 dB. Cabría esperar que la profundidad del desvanecimiento fuera menos de 2,5 dB por lo menos durante el 99% del tiempo [CERS, 1974; Norton y otros, 1965]. Al hacer esa operación se partió de los siguientes supuestos:

- el ángulo de discriminación con la zona reflectora es de aproximadamente 10° ;
- el sistema de puntería de la antena usa una señal de referencia independiente de la señal recibida, para compensar el cabeceo y el balanceo del barco, etc.;
- el factor de eficacia de polarización de la antena para la energía de trayectos múltiples es igual a la unidad (es decir, respuesta de polarización cruzada).

Estas extrapolaciones, que son útiles para obtener un orden de magnitud de profundidades de desvanecimiento típicas, debe utilizarse con cautela; particularmente, el caso c) anterior no valdría en la práctica porque es previsible que la respuesta de polarización cruzada de la antena sea peor fuera del eje que en el centro del haz. Además, la profundidad de desvanecimiento correspondiente adoptada en los sistemas existentes o proyectados es de 4 dB con un ángulo de elevación de 5° , y de 1,8 dB con un ángulo de elevación de 10° . Estos valores concuerdan bastante bien con los resultados experimentales comunicados en el Informe 763.

A juzgar por los análisis y algunos experimentos, los márgenes necesarios para desvanecimientos de bajos porcentajes de tiempo ($p \leq 99\%$) con desvanecimiento difuso de trayectos múltiples, serán mayores que con desvanecimiento especular máximo en las mismas condiciones.

Las estadísticas de las pérdidas de desvanecimiento difuso de trayectos múltiples son aproximadamente gaussianas con relaciones elevadas de potencia directa/indirecta ($C/I_{mp} > 10$ dB). La prudente aproximación aquí adoptada es el uso de un promedio cero ($L_m = 0$ dB) y una estimación de la desviación típica basada en los valores de pérdida de 99% arriba mencionados.

7.3 Márgenes acumulativos

Como se ve, puede ser importante la inclusión de márgenes para las pérdidas de bloqueo y de centelleo ionosférico; se ha supuesto aquí que no hay ninguna pérdida normal de bloqueo ni de centelleo cuando se establecen amplios márgenes para el sistema. Sin embargo, esas pérdidas debieran incluirse en un margen del caso más desfavorable, que podría utilizarse con un objetivo de calidad «marginalmente aceptable» inferior al criterio de calidad normal para telefonía.

8. Márgenes para los enlaces de conexión

8.1 Pérdidas fijas de larga duración

La única pérdida fija de larga duración que interviene en los presupuestos de potencia es la absorción atmosférica, $L_a(\alpha)$.

8.2 Pérdidas aleatorias de larga duración

Estas pérdidas comprenden:

- L_p : pérdida de acoplamiento de polarización: pérdida media = 0,05 dB; desviación típica = 0,02 dB con relaciones axiales de las antenas costera/satélite de 0,5 dB/3 dB;
- L_t : fluctuaciones de la potencia del transmisor en la explotación en 6 GHz: pérdida media = 0 dB; desviación típica = 0,12 dB;
- $L_e(\alpha)$: exceso de atenuación rebasado no más del 0,01% del tiempo: pérdida media = 0 dB, desviación típica = 0,27 dB para la explotación a 6 GHz y 0,14 dB para la explotación a 4 GHz.

8.3 Pérdidas aleatorias de corta duración

La pérdida de puntería de la antena de la estación terrena costera aquí supuesta es de 0,2 dB, con una pérdida media de 0 dB y una desviación típica de 0,05 dB. No se ha previsto margen alguno para el centelleo ionosférico en los valores correspondientes al 99,99%.

$DT_s(\alpha)$: degradación debida al exceso de ruido del cielo en dB; pérdida media = 0 dB, desviación típica = 0,32 dB.

9. Balances de potencia del enlace

Los márgenes para las pérdidas aleatorias acumulativas indicadas en los cuadros I y II, se han calculado a base de los valores de las pérdidas correspondientes supuestos para cada parámetro e independientemente para cada parte del enlace. Los balances de potencia se pueden usar para determinar las necesidades probables de potencia del sistema y se basan en la hipótesis de una C/N_0 necesaria resultante de 53 dBHz para el balance de referencia de telefonía; esto supone un ángulo de elevación de 5° en las estaciones terrenas costeras, de 10° en las estaciones terrenas de barco y ningún desvanecimiento por trayectos múltiples en los enlaces barco-satélite. Se indican también los valores de C/N_0 cuando se produce desvanecimiento por trayectos múltiples en los enlaces barco-satélite, para un ángulo de elevación de 5° y 10° en las estaciones de barco. Se supone que la contribución debida al ruido global de fase en el oscilador local de transposición de frecuencia es despreciable y, en consecuencia, no está incluida en los balances de potencia del enlace.

10. Otros factores que afectan el balance de potencia del enlace

10.1 Carga relativa del transpondedor

Como la capacidad del satélite está concebida para satisfacer necesidades de tráfico con un grado de servicio determinado, en la hora más cargada el número de portadoras ocupadas será, como término medio, considerablemente menor que el de plena carga. Debido a que las características típicas de amplificación no lineal de la mayoría de los amplificadores de satélite están próximas a la saturación, la p.i.r.e. por portadora aumenta en proporción casi directa a la disminución del número de portadoras a plena carga. En consecuencia, la p.i.r.e. media por portadora durante la hora más cargada será superior a la p.i.r.e. a plena carga en una pequeña gama del orden de 1 dB.

Para sistemas telefónicos de un solo canal por portadora (SCPC) en que se liberen llamadas bloqueadas (Erlang B), la probabilidad, $P(n)$, de que se utilicen exactamente n canales o un número inferior de entre s canales durante la hora cargada viene dada por [Cooper, 1972],

$$P(n) = 1 - \sum_{j=n}^s p_j$$

en donde, p_j es la probabilidad de que se estén utilizando exactamente j canales, obtenida mediante la fórmula,

$$p_j = \begin{cases} B(s,a) & \text{para } j=s \\ \frac{B(s,a)}{s} & \text{para } j < s \\ \prod_{k=j+1}^s a/k & \end{cases}$$

en donde, $B(s,a)$ es la probabilidad de bloqueo en la hora cargada [Dill y Gordon, 1978] y « a » es el tráfico ofrecido en la hora cargada (Erlang).

Suponiendo que el transmisor se opere en condiciones de saturación, el aumento en la p.i.r.e. por portadora con relación a la p.i.r.e. por portadora a plena carga es, con probabilidad $P(n)$,

$$\Delta = 10 \log(s/n)$$

En el cuadro III figuran varios ejemplos numéricos en las gamas de interés. Debe señalarse que, durante la hora cargada, todos los canales se utilizan para $(1 - B(s,a)) \times 100\%$ del tiempo. Para una probabilidad de bloqueo del 2% ($B(s,a) = 0,02$), esto corresponde al 98% del tiempo.

10.2 Control adaptable de la potencia de transmisión del satélite

En los puntos anteriores, se ha supuesto que la potencia de transmisión del satélite es fija. Sin embargo, en un sistema SCPC en el que puede variarse la potencia de transmisión del satélite controlando la potencia de transmisión de la estación terrena costera para cada portadora SCPC, puede mantenerse la calidad del enlace por satélite costera-barco (C/N o S/N), en el valor constante requerido. Esto puede lograrse retransmitiendo la calidad del enlace por satélite costera-barco, medida en la estación terrena de barco, a través del enlace barco-costera y controlando adecuadamente la potencia de transmisión de la estación terrena costera utilizando esta información retransmitida.

Aplicando este método de control de la potencia, pueden compensarse las lentas variaciones aleatorias en la calidad del enlace por satélite producidas por diferencias de ganancia de la antena del satélite, precipitaciones o desvanecimiento. En consecuencia podría aumentarse el número de canales SCPC en el transpondedor del satélite [Egami y otros, 1980].

El estudio de los métodos de control adaptable de la potencia, como posible medio para utilizar más eficazmente la potencia de los satélites a largo plazo, debe incluir los efectos prácticos, operacionales y económicos en los diseños actuales de las estaciones terrenas costeras, estaciones terrenas de barco y sistema de señalización por satélite.

11. Resumen

Este Informe ha puesto de manifiesto la forma en que se pueden tomar en consideración los parámetros fijos y variables de los enlaces, al elaborar los balances de potencia en los enlaces de un sistema del servicio móvil marítimo por satélite.

Las estadísticas de pérdidas acumulativas utilizadas para evaluar los márgenes se han aproximado a la normal, tomando para la media y la varianza la suma de las medias y las varianzas de las pérdidas individuales.

Al elaborar el balance en un enlace particular se deberán confirmar las hipótesis sentadas con respecto a la independencia de los factores de pérdida y a una distribución normal.

Es preciso seguir estudiando los balances de potencia para servicios distintos de la telefonía y para estaciones terrenas de barco que tienen una G/T distinta de $-4 \text{ dB(K}^{-1}\text{)}$. Asimismo, es necesario continuar los estudios sobre la relación entre tráfico, capacidad del satélite y características de la p.i.r.e.

CUADRO I — Balance de potencia para el enlace costera-barco

| | Unidad | Ángulo de elevación del satélite | | |
|--|----------------------|----------------------------------|--------|----------------|
| | | 5° | | |
| 1. Costera-satélite (6,42 GHz, 99,99% del tiempo) | | | | |
| p.i.r.e por canal de la estación costera (valor nominal) | dBW | 60 | | |
| Pérdida debida a fluctuaciones de la potencia del transmisor ⁽¹⁾ | dB | [0,5] | | |
| Pérdida debida a errores de puntería ⁽¹⁾ | dB | [0,2] | | |
| Pérdida del trayecto en espacio libre | dB | 200,9 | | |
| Pérdida de absorción atmosférica | dB | 0,5 | | |
| Exceso de atenuación debido a precipitaciones ⁽¹⁾ | dB | [1,0] | | |
| Pérdida de acoplamiento de polarización ⁽¹⁾ | dB | [0,1] | | |
| Margen total para pérdidas aleatorias | dB | 1,2 | | |
| G/T del satélite | dB(K ⁻¹) | -16 | | |
| Constante de Boltzmann | dB(J/K) | -228,6 | | |
| C/N ₀ (ruido térmico) en el trayecto ascendente | dBHz | 70 | | |
| C/I ₀ (ruido de intermodulación) en la estación terrena costera | dBHz | 75 | | |
| C/I ₀ (ruido de intermodulación) en el transpondedor del satélite | dBHz | 63,8 | | |
| C/(N ₀ + I ₀) transmitida | dBHz | 62,6 | | |
| | | 99% del tiempo | | 80% del tiempo |
| | | 5° | 10° | 10° |
| 2. Satélite-barco (1,54 GHz) | | | | |
| p.i.r.e. por canal en el satélite (potencia útil) | dBW | 18,0 | 18,1 | 18,1 |
| Pérdida del trayecto en el espacio libre | dB | 188,5 | 188,4 | 188,4 |
| Pérdida de absorción atmosférica | dB | 0,4 | 0,2 | 0,2 |
| Pérdida de desvanecimiento por trayectos múltiples ⁽¹⁾ | dB | [4,0] | [1,8] | [0] |
| Pérdida adicional debida al radomo húmedo ⁽¹⁾ | dB | [0,5] | [0,5] | [0,4] |
| Degradación de la temperatura de ruido ⁽¹⁾ | dB | [0,3] | [0,3] | [0,2] |
| Pérdida de acoplamiento de polarización ⁽¹⁾ | dB | [0,4] | [0,4] | [0,3] |
| Pérdida debida a errores de seguimiento ⁽¹⁾ | dB | [0,5] | [0,5] | [0,4] |
| Margen total para las pérdidas aleatorias | dB | 4,8 | 2,7 | 1,1 |
| G/T del terminal del barco | dB(K ⁻¹) | -3,5 | -3,5 | -3,5 |
| Constante de Boltzmann | dB(J/K) | -228,6 | -228,6 | -228,6 |
| C/N ₀ del trayecto descendente | dBHz | 49,4 | 51,9 | 53,5 |
| C/(N ₀ + I ₀) transmitida | dBHz | 62,6 | 62,6 | 62,6 |
| C/(N ₀ + I ₀) resultante | dBHz | 49,2 | 51,5 | 53,0 |

⁽¹⁾ Pérdida aleatoria; las cifras encerradas entre corchetes [] no están directamente incluidas en el balance, sino combinadas como se explica en el punto 6.3.

CUADRO II — Balance de potencia para el enlace barco-costera

| | Unidad | Ángulo de elevación del satélite | | |
|---|----------------------|----------------------------------|--------|----------------|
| | | 99% del tiempo | | 80% del tiempo |
| | | 5° | 10° | 10° |
| 1. Barco-satélite (1,64 GHz) | | | | |
| p.i.r.e. de la estación terrena del barco (valor nominal) | dBW | 37 | 37 | 37 |
| Pérdida debida a fluctuaciones de la potencia del transmisor ⁽¹⁾ | dB | [0,5] | [0,5] | [0,5] |
| Pérdida debida a errores de puntería ⁽¹⁾ | dB | [0,5] | [0,5] | [0,4] |
| Pérdida adicional debida al radomo húmedo ⁽¹⁾ | dB | [0,5] | [0,5] | [0,4] |
| Pérdida del trayecto en el espacio libre | dB | 189,0 | 188,9 | 188,9 |
| Pérdida de absorción atmosférica | dB | 0,4 | 0,2 | 0,2 |
| Pérdida por desvanecimiento de trayectos múltiples ⁽¹⁾ | dB | [4,0] | [1,8] | [0] |
| Pérdida por acoplamiento de polarización ⁽¹⁾ | dB | [0,4] | [0,4] | [0,3] |
| Margen total para pérdidas aleatorias | dB | 4,8 | 2,6 | 1,0 |
| G/T del satélite | dB(K ⁻¹) | -12,2 | -12,1 | -12,1 |
| Constante de Boltzmann | dB(J/K) | -228,6 | -228,6 | -228,6 |
| C/N_0 (ruido térmico) del trayecto ascendente | dBHz | 59,2 | 61,8 | 63,4 |
| C/I_0 (ruido de intermodulación) del transpondedor del satélite | dBHz | 65,8 | 68,4 | 70 |
| $C/(N_0 + I_0)$ transmitida | dBHz | 58,3 | 60,9 | 62,5 |
| | | 5° | | 5° |
| 2. Satélite-costera (4,20 GHz, 99,99% del tiempo) | | | | |
| p.i.r.e. por canal del satélite (potencia útil) | dBW | -12,3 | -9,7 | -8,1 |
| Pérdida del trayecto en el espacio libre | dB | 197,1 | 197,1 | 197,1 |
| Pérdida de absorción atmosférica | dB | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Exceso de atenuación debido a las precipitaciones ⁽¹⁾ | dB | [0,5] | [0,5] | [0,5] |
| Degradación debida a exceso de ruido celeste ⁽¹⁾ | dB | [1,2] | [1,2] | [1,2] |
| Pérdida por acoplamiento de polarización ⁽¹⁾ | dB | [0,1] | [0,1] | [0,1] |
| Pérdida debida a errores de seguimiento ⁽¹⁾ | dB | [0,2] | [0,2] | [0,2] |
| Margen total para las pérdidas aleatorias | dB | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| G/T de la estación costera (cielo despejado) | dB(K ⁻¹) | 32 | 32 | 32 |
| Constante de Boltzmann | dB(J/K) | -228,6 | -228,6 | -228,6 |
| C/N_0 del trayecto descendente | dBHz | 49,3 | 51,9 | 53,5 |
| $C/(N_0 + I_0)$ transmitida | dBHz | 58,3 | 60,9 | 62,5 |
| $C/(N_0 + I_0)$ resultante | dBHz | 48,8 | 51,4 | 53,0 |

(¹) Pérdida aleatoria; las cifras encerradas entre corchetes [] no están directamente incluidas en el balance, sino combinadas según se explica en el punto 6.3.

CUADRO III — p.i.r.e. relativa por portadora para una probabilidad de bloqueo del 2%

| Tráfico ofrecido en la hora cargada (Erlang) (a) | Número de canales (s) | Número de canales (n) | $P(n)$ (%) | Δ (dB) |
|--|-----------------------|-----------------------|------------|---------------|
| 17,5 | 25 | 21 | 79,6 | 0,76 |
| 21,93 | 30 | 26 | 81,3 | 0,62 |
| 31,00 | 40 | 36 | 83,4 | 0,46 |
| 40,26 | 50 | 45 | 79,9 | 0,46 |
| 87,97 | 100 | 94 | 80,8 | 0,27 |

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CANADÁ, Gobierno de [10 de septiembre de 1973] High latitude ionospheric fading measurements at 254 MHz and 1550 MHz at Churchill, Manitoba. Grupo de expertos en satélites marítimos de la OCMI; tercera reunión, MARSAT III/3/4.
- CERS [febrero de 1974] A ship-balloon communication experiment 1973, Vol. I, (Centre européen de recherche spatiale/Agence Spatiale Européenne).
- COOPER, R. B. [1972] *Introduction to Queueing Theory* MacMillan Co. New York.
- DILL, G. D. y GORDON, G. D. [otoño de 1978] Efficient computation of Erlang loss functions *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 8, 2, 353-370.
- EGAMI, S., OKAMOTO, T. y FUKETA, H. [febrero de 1980] K-band mobile earth station for domestic satellite communication. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-28, 291-294.
- ESA [1976] European communications experiments in L-band with ATS-6 (European Space Agency), Vol. III (marzo de 1976) y Vol. IV (diciembre de 1975).
- GOLDEN, T. S. y SESSIONS, W. V. [1972] Simultaneous L-band and ionospheric fading effects at the geomagnetic equator. Presented at International Union of Radio Science, 1972 Spring Meeting, Washington DC.
- INMARSAT [julio de 1978] INMARSAT Preparatory Committee Technical Panel. PREPCOM/TECH/REPORT 4, Annex V.
- LANCRENON, B., STECIW, A. y VANDENKERCKHOVE, J. A. [mayo de 1976] Maritime satellite payloads. *ESA/ASE Bull.* (European Space Agency), 5, 50-53.
- MARISAT [marzo de 1977] MARISAT system description. COMSAT General Corporation, Washington DC. Presented at INMARSAT Preparatory Committee Technical Panel Meeting, 9-13 de mayo de 1977, Paris.
- NORTON, K. A., VOGLER, L. E., MANSFIELD, W. V. y SHORT, P. J. [octubre de 1965] The probability distribution of the amplitude of a constant vector plus a Rayleigh-distributed vector. *Proc. IRE*, Vol. 43, 1354-1361.
- OCMI [1973] Grupo de expertos en satélites marítimos — Segunda reunión (30 de abril-4 de mayo de 1973). Theoretical estimates of multipath parameters for L-band satellite-ship links. MARSAT II/4/4, Nota del Gobierno de Estados Unidos de América.
- WOOD, P. J. y BOSWELL, A. [30 de mayo de 1974] Optimization of antenna gain for earth coverage from a geostationary satellite. *Electron. Lett.*, Vol. 10, 11, 227-228.
-