

RECOMENDACIÓN UIT-R F.1106

EFFECTOS DE LA PROPAGACIÓN EN EL DISEÑO Y EXPLOTACIÓN DE SISTEMAS DE RELEVADORES RADIOELÉCTRICOS TRANSHORIZONTE

(Cuestión UIT-R 103/9)

(1994)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los efectos de la propagación son esenciales para el diseño y explotación de los sistemas de relevadores radioeléctricos transhorizonte;
- b) que las características de transmisión pueden determinarse sobre la base de las propiedades de amplitud y de fase de una señal recibida;
- c) que la variación de la amplitud en el tiempo consiste en una variación rápida superpuesta a un cambio lento;
- d) que las variaciones rápidas, originadas esencialmente por fenómenos de interferencia de fase debidos a la propagación por trayectos múltiples, puede mitigarse en muchos casos empleando técnicas de diversidad;
- e) que los efectos de las variaciones lentas de la potencia recibida pueden reducirse a un mínimo utilizando equipo de transmisión de gran potencia, antenas de ganancia elevada, control automático del nivel de p.i.r.e., sistemas de recepción de muy bajo nivel de ruido, líneas de alimentación de baja pérdida, métodos de adaptación de la carga a las condiciones de transmisión, técnicas de detección perfeccionadas y otros métodos que permiten obtener un funcionamiento óptimo con la portadora radioeléctrica, la anchura de banda y la modulación elegidas,

recomienda

1. que se tomen en consideración las orientaciones que figuran en el anexo 1 a la hora de diseñar y explorar sistemas de relevadores radioeléctricos transhorizonte (véanse las notas 1 y 2);
2. que, en particular, se tomen en consideración los siguientes factores al diseñar y explotar sistemas de relevadores radioeléctricos digitales transhorizonte:
 - 2.1 la ganancia combinada de las antenas de transmisión y recepción puede ser inferior a la suma de sus ganancias con ondas planas, como se describe en el § 2 del anexo 1. Esta disminución aparente de la ganancia se denomina «degradación de la ganancia» o «pérdida por acoplamiento entre la antena y el medio»;
 - 2.2 conviene remitirse a la Recomendación UIT-R F.698 en lo que respecta a las bandas de frecuencias preferidas para los sistemas de relevadores radioeléctricos transhorizonte;
 - 2.3 las técnicas de diversidad, tales como la diversidad en el espacio, la diversidad de frecuencias y la diversidad angular resultan eficaces para mitigar los efectos adversos de las variaciones rápidas de una señal recibida, según se describe en el § 4.1 del anexo 1;
 - 2.4 la anchura de banda de transmisión de un sistema que utilice técnicas de diversidad puede estimarse con arreglo a los métodos descritos en el § 4.2 del anexo 1;
 - 2.5 para atenuar los efectos de la dispersión debida a la propagación por trayectos múltiples en los sistemas de relevadores radioeléctricos transhorizonte digitales conviene tener en cuenta el orden de diversidad y utilizar igualación adaptativa y módems eficaces, como se describe en el § 5 del anexo 1;
 - 2.6 para reducir el efecto de la interferencia ocasionada a otros sistemas por las señales transmitidas por los lóbulos laterales y sobreoscilaciones en condiciones de propagación mejorada, debe considerarse la utilización de control automático del nivel de la potencia del transmisor en función del nivel recibido en los receptores distantes conexos.

Nota 1 – Esta Recomendación se aplica a los sistemas transhorizonte que utiliza dispersión troposférica, pero no necesariamente a los sistemas transhorizontes que utilicen otros modos de propagación (difracción, etc.).

Nota 2 – Por lo que refiere a los datos de propagación requeridos para diseñar sistemas de relevadores radioeléctricos transhorizonte, véase la Recomendación UIT-R PN.617.

ANEXO 1

Factores relativos a los efectos de propagación en el diseño y explotación de sistemas de relevadores radioeléctricos transhorizonte**1. Introducción**

El presente anexo concierne a los sistemas que transportan un número relativamente pequeño de canales telefónicos o una señal de televisión.

Las características de transmisión pueden definirse en función de la amplitud y de la fase de la señal recibida. Para un sistema transhorizonte, estas características de transmisión (amplitud y fase) varían con la frecuencia y con el tiempo.

Se comprueba que las variaciones de la amplitud en función del tiempo consisten en una variación rápida superpuesta a una variación más lenta. La primera, que se debe esencialmente a fenómenos de propagación por trayectos múltiples, puede, en muchos casos, atenuarse empleando la recepción por diversidad. En cuanto a los efectos de la variación lenta de la potencia recibida, pueden reducirse utilizando equipos de transmisión de gran potencia, antenas de ganancia elevada, sistemas de recepción de muy bajo nivel de ruido, líneas de alimentación de baja pérdida, métodos de adaptación de la carga a las condiciones de transmisión, procedimientos de detección más perfeccionados, y cuantos otros métodos permitan obtener un funcionamiento óptimo, asociados a la elección adecuada de la portadora radioeléctrica, de la anchura de banda y de la modulación.

2. Disminución de la ganancia de antena

La ganancia global de las antenas transmisora y receptora puede ser inferior a la suma de ganancias de esas antenas para las ondas planas. Esta disminución aparente de la ganancia se denomina «degradación de la ganancia» o «pérdida por acoplamiento entre la antena y el medio». Los análisis teóricos muestran que la pérdida depende de la ganancia de antena y del ángulo de dispersión.

Se ha comprobado experimentalmente que la ganancia de antena para el trayecto, o ganancia total equivalente de la antena para un sistema transhorizonte, es prácticamente independiente de la distancia entre unos 150 y 500 km. Según dichos experimentos, puede considerarse que la ganancia total equivalente (véase la fig. 1) depende únicamente de la suma de las ganancias de las antenas en el espacio libre, sin grandes correcciones, siempre y cuando ninguna de las ganancias en el espacio libre exceda de unos 50 dB y las ganancias de las dos antenas no difieran mucho.

Otros estudios han mostrado que la disminución de la ganancia de la antena está relacionada con la pendiente de la curva del gradiente del índice de refracción en función de la altura en el volumen común y, por consiguiente, la ley de variación de la disminución de la ganancia de antena en función de la distancia depende un poco del clima. Estos estudios muestran también que, cuando aumenta la ganancia de la antena, la pendiente de la curva de la fig. 1 tiende asintóticamente a 1/4.

3. Elección de la banda de frecuencia

La elección de una banda de frecuencias para sistemas de relevadores radioeléctricos transhorizonte depende de las consideraciones siguientes:

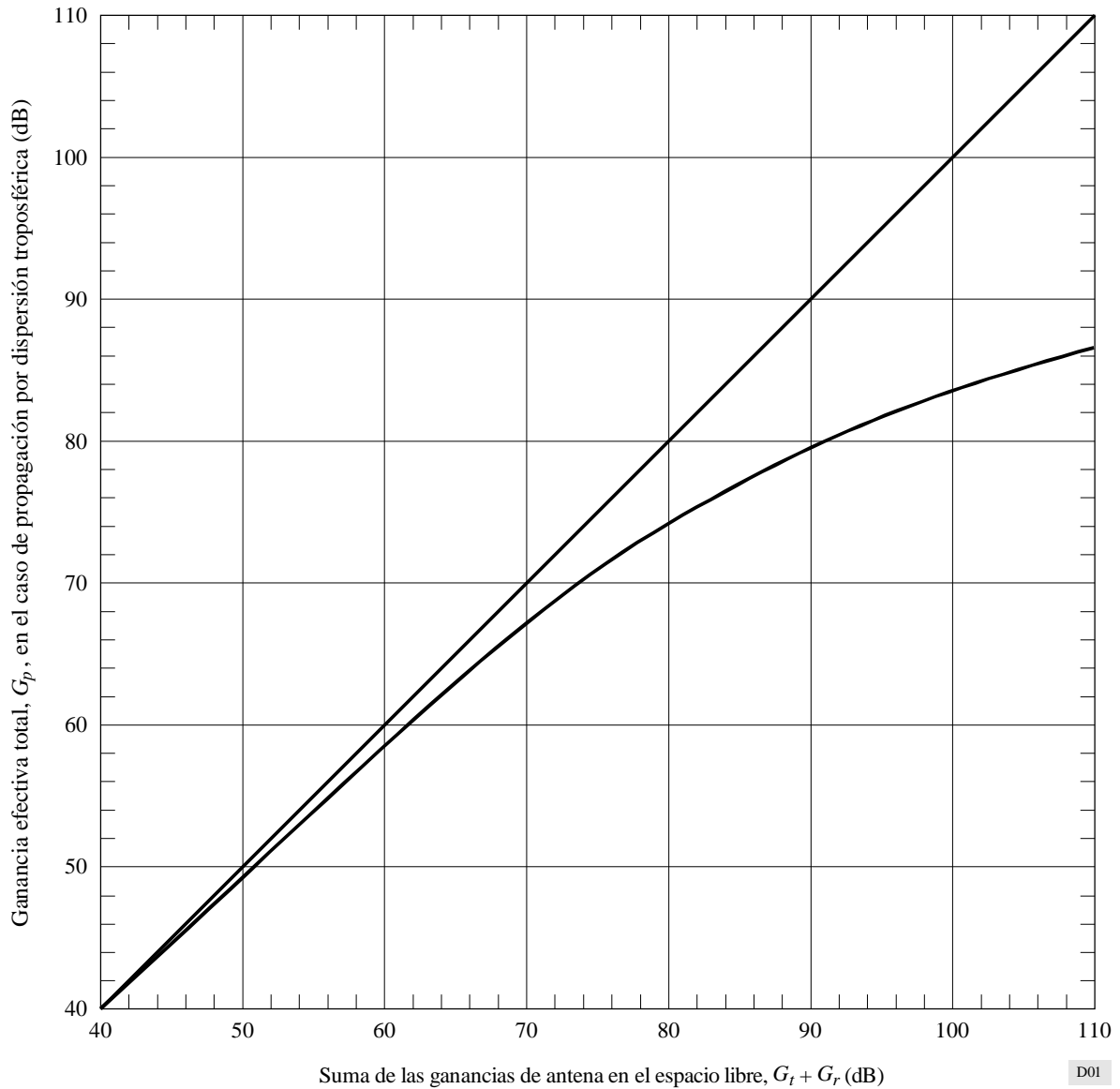
- la propagación, para obtener un nivel de recepción suficiente y una anchura de banda de transmisión adecuada,
- la compartición de frecuencias, en relación con la elevada potencia de transmisión habitual de los sistemas transhorizonte.

Estas cuestiones se tratan en la Recomendación UIT-R F.698.

4. Recepción por diversidad en enlaces de relevadores radioeléctricos transhorizonte

La mayoría de los sistemas transhorizonte, están diseñados para reducir los efectos perjudiciales de las fluctuaciones debidas a la propagación aprovechando las propiedades de correlación parcial de la señal transmitida mediante el empleo de una recepción o de una transmisión por diversidad, o ambas a la vez. Las técnicas de diversidad resultan muy útiles para los sistemas de relevadores radioeléctricos digitales transhorizonte pues reduce la degradación a corto plazo que causan los desvanecimientos debidos a la propagación por trayectos múltiples.

FIGURA 1
Relación entre las ganancias de antena (propagación troposférica)



DOI

4.1 Métodos para obtener señales por diversidad

4.1.1 Generalidades

Los métodos más clásicos son la diversidad de frecuencias (transmisión simultánea de la misma señal por dos o más radiocanales) y la diversidad en el espacio (empleo de dos o más antenas en la recepción, en la transmisión, o en ambas). Algunos sistemas utilizan una combinación de diversidad de frecuencias y de diversidad en el espacio. Se han comprobado también las ventajas que ofrece una forma de recepción por diversidad en la cual se aprovechan las propiedades, relativamente sin correlación, de la dirección de llegada y que permite reducir, no sólo las dificultades debidas a los desvanecimientos rápidos, sino también las pérdidas por acoplamiento entre la antena y el medio circundante.

No se requieren bajos valores del coeficiente de correlación para experimentar una ganancia sustancial en la operación por diversidad.

4.1.2 *Diversidad en el espacio en sistemas por dispersión troposférica*

En lo que respecta a la diversidad en el espacio, se han estudiado las distancias teóricas de diversidad en función de la distancia de correlación horizontal D_h normal al trayecto, de la distancia de correlación horizontal D_a paralela al trayecto (a lo largo de éste) y de la distancia de correlación vertical D_v . El parámetro más utilizado, D_h se expresa por:

$$D_h = 3 \lambda a / 4d \quad (1)$$

donde:

d : longitud del trayecto

a : radio equivalente de la Tierra

λ : longitud de onda.

En numerosos sistemas por dispersión troposférica, se toma frecuentemente el valor $D_h = 100 \lambda$.

4.1.3 *Diversidad de frecuencia en los sistemas por dispersión troposférica*

Se ha encontrado teóricamente que el coeficiente de correlación entre las envolventes de dos señales es:

$$\rho (f_2 - f_1) = \exp \left[- (2 \pi \sigma)^2 (f_2 - f_1)^2 \right] \quad (2)$$

fórmula en la que:

$$\sigma = 2l (\text{sen } (\theta / 2) / c)$$

siendo:

θ : ángulo de dispersión

c : velocidad de la luz

l : desviación típica de cada dimensión del volumen de dispersión (en coordenadas trirrectangulares); l es función de parámetros geométricos y radiometeorológicos.

La correlación en frecuencia ha despertado entre los investigadores mayor interés que la correlación en el espacio. La correlación en frecuencia no es sólo importante para evaluar la capacidad de anchura de banda, sino que constituye también un parámetro para la realización de los sistemas por diversidad de frecuencias. Naturalmente, el valor mínimo de la separación de frecuencias que ha de utilizarse depende de la anchura del haz de las antenas y de la distancia. Basta con una separación de 3 MHz para producir un coeficiente de correlación inferior o igual a 0,6 en trayectos de 226 y de 345 km, en las frecuencias de 600 ó 2 120 MHz, con una antena de transmisión de 10 m y una de recepción de 3 m.

4.1.4 *Diversidad angular en sistemas por dispersión troposférica*

La diversidad angular es un método útil que permite obtener el uso máximo de una banda de frecuencias limitada. Los resultados de algunas pruebas hechas en el Reino Unido, efectuadas entre 1,7 y 2,7 GHz en trayectos de 250 y 350 km, muestran que, con antenas de 18 a 25 m de diámetro, se obtienen coeficientes de correlación de 0,2 y 0,4 con dos haces radioeléctricos separados aproximadamente el valor de una anchura del haz, debiéndose la cifra más baja a la diversidad angular vertical. Estos resultados concuerdan muy bien con la teoría. Las pruebas revelaron una importante falta de correlación a medio plazo, así como una marcada tendencia del coeficiente de correlación cruzada entre haces a corto plazo a decrecer a medida que disminuye el nivel de la señal. El primer efecto es peculiar de la diversidad angular. Se puede prever que la calidad de funcionamiento global de un enlace por diversidad angular correctamente construido se aproximará a la de la diversidad de frecuencias, a pesar del ligero aumento en la pérdida de transmisión, que se puede atribuir a imperativos de construcción.

Según ciertas consideraciones teóricas, la diversidad angular alcanza sus resultados más eficaces con grandes ángulos de dispersión.

Una nueva confirmación de la eficacia de la diversidad angular la dan las pruebas efectuadas en Japón en 1,8 GHz, sobre un trayecto de 256 km, con antenas de 19 m de diámetro (ganancia: 47,5 dB), donde se lograron coeficientes de correlación inferiores a 0,4 para separaciones de haz superiores a unos 6 mrad.

4.2 Consideraciones sobre la anchura de banda de transmisión

Cuando se evalúa la influencia de la recepción por diversidad, desde el punto de vista de la anchura de banda y de la calidad de transmisión, conviene caracterizar el sistema de transmisión por una red que tenga características amplitud/frecuencia y fase/frecuencia que varíen con el tiempo en forma aleatoria.

Teóricamente, la dispersión de amplitud lineal, z , puede evaluarse suponiendo que la amplitud de la señal en el extremo de la banda de paso obedece a una ley de distribución de Rayleigh. La probabilidad de que $z < Z$ para la recepción sin diversidad puede mostrarse como sigue, donde Z muestra el valor dado de la dispersión de amplitud lineal:

$$P(z < Z) = 1 - \frac{1 - Z^2}{\sqrt{(1 + Z^2)^2 - 4rZ^2}} \quad (3)$$

donde:

r : coeficiente de correlación para la anchura de banda,

$$r = \exp \left[- \left(\frac{\Delta f}{\Delta f_0} \right)^2 \right]$$

Δf : anchura de banda.

Para enlaces de relevadores radioeléctricos con dispersión troposférica:

Δf_0 : banda de paso de correlación

$$\Delta f_0 = \frac{ac}{d^2 \alpha}$$

a : radio equivalente de la Tierra

c : velocidad de la luz

d : longitud del trayecto

α : anchura del haz de la antena en los puntos de potencia mitad.

Para una recepción por diversidad de orden N , la probabilidad de P_N para $z < Z$ puede escribirse:

$$P_N(z < Z) = \Phi \left(\sqrt{\frac{\pi N}{4 - \pi}} \right) - \Phi \left(\sqrt{\frac{\pi N}{4 - \pi}} \times \frac{1 - Z}{\sqrt{Z^2 - 2rZ + 1}} \right) \quad (4)$$

donde:

$$\Phi(y) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y \exp(-t^2/2) dt \quad (\text{integral de probabilidad})$$

Se ha informado sobre los resultados de mediciones hechas para verificar la teoría. En las mediciones efectuadas con $\Delta f = 0,5$ MHz, se ha encontrado $z < 0,7$ para el 30% del tiempo sin diversidad, y para el 3% del tiempo con diversidad (doble). Se estima que, con órdenes de diversidad más elevados, la mejora es más grande.

Para los sistemas que funcionan con multiplaje por distribución de frecuencia, las características de anchura de banda del trayecto de transmisión son tales que pueden introducir un ruido de intermodulación en los canales telefónicos transmitidos. Este ruido es variable en el tiempo y se presenta a menudo en forma de picos de ruido. Se ha demostrado que el empleo de la recepción por diversidad puede reducir la probabilidad de aparición de esos picos de ruido de intermodulación.

La comparación entre los valores calculados y los valores medidos del ruido de intermodulación debido a la propagación por trayectos múltiples muestra una concordancia satisfactoria. Las mediciones se hicieron en un trayecto transhorizonte de 303 km de longitud, con una antena de anchura de haz de 1° .

5. Efectos de la dispersión debida a la propagación por trayectos múltiples en la calidad de funcionamiento de los sistemas digitales transhorizonte

5.1 Efectos generales de la dispersión temporal por trayectos múltiples

La dispersión por trayectos múltiples en el enlace digital transhorizonte es considerablemente pero que la dispersión correspondiente en un trayecto con visibilidad directa en una banda de frecuencias determinada. Por lo tanto, la influencia de la dispersión por trayectos múltiples como factor limitativo de la calidad de funcionamiento de las comunicaciones, en vez de la relación señal/ruido, comienza a producirse a una velocidad de transmisión menor en los enlaces transhorizonte que en los enlaces con visibilidad directa.

Puede obtenerse una mejora considerable de la calidad de funcionamiento con la mejora de la diversidad intrínseca utilizando una igualación adaptable.

Las predicciones:

- del aumento de la probabilidad de error debido a la dispersión por trayectos múltiples para un conjunto dado de equipos y parámetros de trayecto, y
- de la mejora de la calidad de recepción por diversidad y/o la reducción de la interferencia entre símbolos que pueden obtenerse con igualación adaptable,

se expresan con respecto a σ , la desviación cuadrática media del retardo, que se obtiene expresando la respuesta impulsiva en potencia del trayecto transhorizonte como una función de la densidad de probabilidad.

5.2 Predicciones y mediciones de la calidad de funcionamiento

La probabilidad media de bits erróneos, P_e , en un enlace transhorizonte sujeto a dispersión causada por la propagación por trayectos múltiples depende de los siguientes parámetros:

$2\sigma/T$: dispersión por trayectos múltiples normalizada, y

W : (energía por bit/densidad espectral de ruido) por radiocanal de diversidad,

donde:

T : periodo de un símbolo.

Para una «dispersión multitrayecto débil» ($2\sigma \ll T$) no se requiere una protección especial contra la interferencia entre símbolos, ya que las técnicas de recepción por diversidad múltiple garantizan el nivel de probabilidad requerido de los errores irreductibles.

En el caso de «dispersión multitrayecto media» ($2\sigma < T$) se utilizan medidas pasivas contra la interferencia entre símbolos, además de la recepción con diversidad. Los métodos activos utilizados para combatir la interferencia entre símbolos cuando la eliminación de éste viene acompañada por el efecto de la diversidad implícita a la dispersión multitrayecto, se caracterizan por una combinación de los diversos métodos pasivos y la utilización de filtros adaptados para la señal que se propaga por trayectos múltiples.

En el caso de la «dispersión multitrayecto intensa» ($2\sigma > T$) la interferencia entre símbolos puede combatirse únicamente utilizando métodos adaptativos especiales en recepción.

En la práctica se observan variaciones de corta y de larga duración en la dispersión debida a la propagación por trayectos múltiples. Las mediciones efectuadas en el Reino Unido indican que para un valor mediano 2σ de 106 ns, la desviación típica de la variación de larga duración en 2σ de muestras de 10 ms, promediadas a lo largo de 92 s, era de 15 ns. La desviación típica de la variación de corta duración en 2σ de muestras de 10 ms era de 50 ns. Para el enlace de prueba de 124 km transmitiendo 2 048 kbit/s con MDP-4 coherente, el valor mediano de $2\sigma/T$ era de 0,1.

5.3 Métodos de transmisión para aumentar el orden equivalente de diversidad

Con una velocidad binaria relativamente baja en la banda de frecuencias atribuida, pueden utilizarse para cada transmisor señales multifrecuencia en paralelo o secuenciales.

Las señales multifrecuencia en paralelos se utilizan para crear una retícula de frecuencias equidistantes por medio de una modulación de frecuencia adicional, y sobre esta base es posible lograr una diversidad de recepción adicional, por ejemplo, la diversidad triple.

Las señales multifrecuencia secuenciales (generalmente, frecuencia cuádruple) pueden utilizarse para la diversidad cuádruple de frecuencia y de tiempo, en combinación con la modulación por desplazamiento de frecuencia y de fase.

Como variante de la técnica de diversidad en el tiempo, se considera una combinación de códigos eficaces y conocidos y del entrelazado binario. No obstante, este método para mejorar la calidad lleva asociados retardos considerables en la transmisión de información.

5.4 *Igualación adaptativa*

El uso de igualación adaptativa reduce la interferencia entre símbolos e incrementa así la capacidad de transmisión de tráfico de los sistemas digitales transhorizonte. La igualación adaptable permite prever la diversidad inherente a la dispersión por trayectos múltiples al diseñar el receptor, con lo que se obtiene una mejora previsible de la proporción de errores para un valor determinado de σ .

Teóricamente, la igualación adaptativa (igualación lineal) en un canal radioeléctrico de propagación por trayectos múltiples, presupone una conexión en cascada entre el filtro adaptado con la señal de llegada y el filtro transversal. No obstante, en condiciones reales, el filtro de entrada se adapta a la señal transmitida de forma que, al eliminar la influencia de la interferencia multisímbolo, no puede lograrse adecuadamente el efecto implícito de diversidad.

La utilización de la realimentación de la decisión es un método no lineal de procesamiento de la señal y puede utilizarse para compensar la interferencia entre símbolos debida a los elementos precursores de la señal.

La recepción con evaluación de una secuencia discreta mediante el algoritmo de Viterbi se considera que es un método adecuado para resolver, con una probabilidad máxima *a posteriori*, el problema de la evaluación de la secuencia de un proceso de Markov discreto en el tiempo con un número finito de estados. Cuando se tiene en cuenta el filtrado adaptado de la señal multitrayecto, se considera que el algoritmo de Biterbi es el método que ofrece la recepción óptima de la señal en un canal de comunicación por trayectos múltiples.

El procesamiento espectral de una señal multitrayecto implica la extracción de una serie de bandas de frecuencia de la señal en el extremo receptor cuando el espectro de dicha señal es más amplio que la anchura de banda de correlación de la frecuencia del canal de comunicación. La combinación de muestras de la señal en la gama de frecuencias con coeficientes de ponderación específicos, permite no sólo eliminar la interferencia entre símbolos, sino también (con el filtrado adaptativo de la señal de componentes de salida) lograr un efecto implícito de diversidad.

Se ha comunicado la transmisión satisfactoria de información a velocidades de hasta 12,6 Mbit/s en 4,6 GHz utilizando módems adaptables en enlaces transhorizonte.

5.5 *Evaluación comparativa de los módems reales*

El cuadro 1 presenta una evaluación comparativa de los módems reales básicos utilizados para la realización de los diversos métodos de transmisión señalados anteriormente.

Para evaluar la inmunidad al ruido del método, se determinó la relación entre la potencia media de la señal recibida y la densidad de ruido espectral para una velocidad binaria de información determinada, con una probabilidad de errores binarios de 10^{-6} . En todos los casos se utilizó la recepción con diversidad cuádruple espacio-frecuencia (dos transmisores, dos antenas). La relación señal/ruido se corresponde con el orden de diversidad equivalente. Se determina el parámetro, β , que caracteriza la relación entre la potencia media de la señal y la densidad de ruido espectral por bits de información transmitida. Se define el parámetro γ que caracteriza la velocidad binaria específica de información.

CUADRO 1

Número	Características del método de transmisión	Parámetros		
		Velocidad binaria de información (Mbit/s)	β (dB)	γ (bit/s) (Hz)
1	Recepción coherente de señales con diversidad frecuencia-tiempo y desplazamiento adaptativo	0,5-1	7	0,05-0,1
2	Recepción de señales componentes MDP-2D de frecuencia equidistante	0,5-2	7	0,08-0,3
3	Filtrado adaptativo de señales multitrayecto utilizando un algoritmo de Viterbi y código Golay (24, 12) con entrelazado	5	7	0,5
4	Igualación adaptativa con realimentación del circuito de decisión	5-10	12	1
5	Procesamiento espectral de la señal MDP-2D multitrayecto	5-10	10	1