

RECOMENDACIÓN UIT-R F.752-1

TÉCNICAS DE DIVERSIDAD PARA SISTEMAS DE RELEVADORES RADIOELÉCTRICOS

(Cuestión UIT-R 106/9)

(1992-1994)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que el desvanecimiento selectivo en frecuencia puede deformar y reducir la intensidad de las señales recibidas en trayectos de visibilidad directa y transhorizonte y disminuir así la calidad de funcionamiento de un sistema de radioenlaces;
- b) que la aplicación de las técnicas de diversidad es útil para reducir los efectos del desvanecimiento sobre la calidad del sistema;
- c) que se necesita proporcionar la recepción por diversidad a fin de alcanzar una calidad satisfactoria en los trayectos por difracción y transhorizonte;
- d) que se han estudiado y están en uso varias técnicas para realizar la diversidad en trayectos de visibilidad directa, con difracción y transhorizonte;
- e) que la aplicación de las técnicas de diversidad puede proporcionar una calidad elevada en los sistemas de visibilidad directa que utilizan eficazmente el espectro radioeléctrico,

recomienda

1. que se utilice la información presentada en el anexo 1 cuando se examine la aplicación de las técnicas de diversidad a los sistemas de radioenlaces;
2. que la elección de las técnicas de diversidad para un sistema de radioenlaces tenga en cuenta las siguientes consideraciones:
 - 2.1 la existencia de numerosos métodos para obtener señales de diversidad en los sistemas de radioenlaces. Los métodos corrientes se describen en el § 1 del anexo 1;
 - 2.2 la existencia de numerosos métodos para tratar las señales de diversidad en los sistemas de radioenlaces. Las disposiciones fundamentales y las consideraciones relativas a la aplicación práctica de algunos de esos sistemas se encuentran en el § 2 del anexo 1;
 - 2.3 en el § 3 del anexo 1 se examina la aplicación de los distintos tipos de técnicas de diversidad y combinación de la diversidad a los sistemas transhorizonte. Puede hallarse información adicional sobre el cálculo de su calidad en la Recomendación UIT-R PN.530;
 - 2.4 al aplicar las técnicas de diversidad a los trayectos de visibilidad directa deben tomarse en cuenta la pérdida de potencia de la señal y la distorsión de la señal, en particular en los sistemas radioeléctricos digitales. Esas consideraciones se hallan en los § 4.1 y 4.2, respectivamente, del anexo 1;
 - 2.5 la efectividad de las distintas técnicas de diversidad en los sistemas de visibilidad directa tiene el apoyo de los estudios sobre la propagación contenidos en los § 4.3 y 4.4 del anexo 1. La caracterización detallada de la efectividad de la propagación por diversidad en un sistema de visibilidad directa puede hallarse en la Recomendación UIT-R PN.530. En la Recomendación UIT-R F.1093, se halla un resumen de las mediciones de distintas técnicas de diversidad en sistemas radioeléctricos digitales en funcionamiento.

Nota 1 – No se tratan en la presente Recomendación las técnicas de diversidad que utilizan medios alternativos de transmisión o la diversidad de ruta, que se aplican a fin de mejorar la disponibilidad.

Técnicas de diversidad para sistemas de relevadores radioeléctricos

1. Métodos para obtener señales por diversidad

Los métodos clásicos se conocen genéricamente como diversidad de frecuencias y diversidad en el espacio. En la diversidad de frecuencias la misma información se transmite por más de un radiocanal. En la diversidad en el espacio, la señal alcanza al receptor recorriendo trayectos radioeléctricos diferentes entre las antenas transmisora y receptora correspondientes. Una descripción de las diferentes posibilidades de diversidad para sistemas afectados de forma diferente por la propagación anómala requiere una descripción detallada de las técnicas de diversidad en el espacio.

Los sistemas transhorizonte utilizan diversidad en el espacio en transmisión y en recepción. Utilizan diversidad múltiple con amplia flexibilidad en el emplazamiento tridimensional de las antenas, y algunas veces diversidad angular formando haces múltiples o diagramas directivos con una sola antena. La diversidad angular proporciona señales relativamente no correlacionadas aprovechando las variaciones del ángulo de llegada en el receptor de la energía dispersada.

En los trayectos con visibilidad directa, la diversidad en el espacio se realiza habitualmente, cuando las degradaciones son la distorsión y la pérdida de potencia de la señal, mediante dos antenas en el receptor con una separación vertical suficiente como para que las señales obtenidas presenten unas degradaciones, debidas al desvanecimiento por trayectos múltiples, suficientemente no correlacionadas. A fin de mantener la calidad de los sistemas radioeléctricos digitales, en los cuales la degradación más importante debida a la propagación es la distorsión de la señal, se han aplicado métodos de diversidad basados en la estructura no uniforme del campo electromagnético incidente cerca de la antena receptora principal, en lugar de utilizar grandes separaciones para que las degradaciones no estén correlacionadas.

En estos métodos, que se denominan de diversidad por diagrama o diversidad angular, la señal de diversidad se obtiene de una segunda antena o haz que tiene un diagrama de directividad o anchura angular del haz diferente en el plano vertical y/o un ángulo de elevación diferente del eje de puntería. Estos métodos de diversidad que pueden realizarse con antenas a la misma o casi la misma altura, o con alimentadores múltiples en una misma antena, permiten añadir la diversidad a un tramo existente sin ampliar la altura de la torre para obtener en el trayecto un margen sobre los obstáculos para la recepción en diversidad. Aunque en ocasiones se ha hecho distinción entre diversidad angular y diversidad por diagrama, en otros casos los dos términos se utilizan indistintamente.

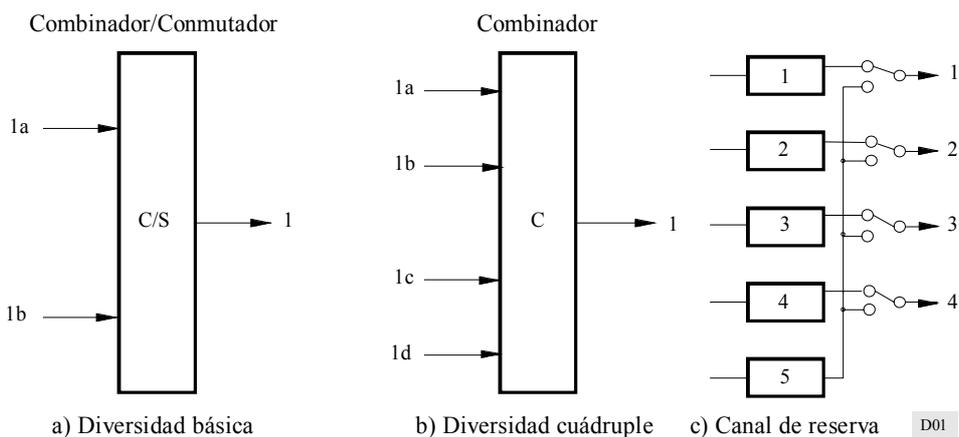
Debido a que la eficacia de cualquier sistema de diversidad depende de la correlación de las degradaciones de las señales, la separación en el espacio, en los ángulos de apuntamiento y las diferencias de frecuencia son fundamentales para determinar la calidad del sistema.

2. Métodos de tratamiento de la señal

2.1 Disposiciones

Las figs. 1a) y 1b) muestran las disposiciones básicas, en el caso de algunos sistemas digitales, en las cuales se utilizan dos o cuatro señales para obtener una salida combinada o seleccionar la mejor. Aunque los sistemas en trayectos con visibilidad directa utilizan a menudo diversidad de frecuencia para realizar la conmutación de reserva 1 + 1 con la disposición de la fig. 1a), es más habitual utilizar uno, o a veces dos, radiocanales de reserva para varios radiocanales de trabajo. En la fig. 1c) se muestra la disposición para el modo de funcionamiento 1 + 4. Dicha protección se aplica con frecuencia conjuntamente con la diversidad de espacio para los radiocanales individuales. En condiciones extremas, como es el caso de trayectos con visibilidad directa con reflexión, la diversidad de espacio se utiliza conjuntamente con protección por diversidad de frecuencia de tipo 1 + 1. Se ha utilizado también para trayectos difíciles largos o sobre agua la diversidad cuádruple, ya sea como diversidad cuádruple de espacio o como una combinación de la diversidad doble de espacio y la diversidad doble de frecuencia.

FIGURA 1
Disposiciones en la combinación para diversidad



2.2 Consideraciones sobre la realización práctica

En los sistemas actuales la diversidad se realiza utilizando combinadores en radiofrecuencia, frecuencia intermedia o frecuencia de banda de base, o utilizando conmutadores en la frecuencia intermedia o en la frecuencia de banda de base. Estos combinadores pueden utilizar algoritmos de control de ganancia, de máxima potencia o de mínima dispersión. Debido a que las diferencias en la calidad de la transmisión son pequeñas, la elección del diseño del equipo entre dichas alternativas se basa normalmente en la conveniencia o el grado de propagación anómala esperada y por las características de la señal transmitida.

La mejora real que puede obtenerse con la diversidad depende de muchos parámetros, entre ellos la influencia de la dispersión de amplitud dentro de banda y de la interferencia entre sistemas sobre la calidad de funcionamiento para un canal determinado, así como de los algoritmos que se apliquen en la realización práctica de la diversidad.

En los sistemas de relevadores radioeléctricos digitales de alta velocidad se han utilizado dispositivos de combinación con mínima dispersión (MID) así como receptores de doble recepción en los que las señales de diversidad se procesan por combinación de máxima potencia (MAP), y la señal global por igualación adaptativa (EQ). La utilización de MAP + EQ produce un efecto sinérgico, es decir una disminución considerable de la proporción de bits erróneos. En la Recomendación UIT-R F.1093 se da más información sobre este efecto sinérgico. Los métodos utilizados para combinar las señales con diversidad de espacio sobre la base del principio de máxima potencia, y que se utilizan en los receptores con MAP + EQ, pueden clasificarse en las tres categorías siguientes:

- MAPEG o combinación máxima potencia igual ganancia. Este método, en el que se utiliza la adición lineal, tiene el inconveniente siguiente: en el caso de producirse un desvanecimiento completo de una de las señales con diversidad, la relación señal/ruido a la salida del combinador es 3 dB peor que la obtenida con un receptor convencional.
- MAPEG/SW o máxima potencia, igual ganancia/combinación por conmutación. En este método se utiliza la adición lineal y no hay ninguna pérdida de la relación señal/ruido como consecuencia de la desconexión del combinador del receptor cuya señal de entrada es $(\sqrt{2} + 1)$ veces más débil que la señal de entrada del segundo receptor. Este método tiene el inconveniente siguiente: durante la conmutación se produce un proceso transitorio que da lugar a un aumento de la proporción de errores en los sistemas digitales de alta velocidad.
- MAPOPT o combinación optimizada de máxima potencia. Este método no tiene los inconvenientes inherentes a los sistemas MAPEG y MAPEG/SW. En el sistema MAPOPT, los ramales de diversidad frente al sumador contienen atenuadores electrónicos cuya atenuación varía automáticamente en proporción a la relación entre las potencias de las señales con diversidad de espacio recibidas. En un combinador MAPOPT se produce la adición lineal cuando la

relación de potencias entre la señal fuerte y la débil $\gamma < 7,7$ dB; si se produce un desvanecimiento adicional se introduce en el trayecto de la señal débil una atenuación progresivamente variable proporcional al parámetro γ . La ganancia de relación señal/ruido del sistema MAPOPT, comparada con la de un receptor convencional, es prácticamente igual a la ganancia definida por un combinador de adición óptimo (combinación de relación máxima o MAR).

Con respecto a los dispositivos de combinación de dispersión mínima (MID – minimum dispersion combining) que también se utilizan para combinar las señales con diversidad de espacio, se pueden considerar los siguientes métodos:

2.3 BER mínima o estrategia ponderada

Este método se basa en la ponderación adecuada de las señales de frecuencia intermedia (o de banda ancha) recibidas y la dispersión en la banda, para minimizar la proporción de bits erróneos (BER).

La función BER se puede calcular en tiempo real a partir del nivel y la dispersión de potencia en la banda (IBPD – in-band power dispersion) de la señal recibida. La optimización de la BER estimada es equivalente a la optimización de la interrupción del tramo del enlace radioeléctrico.

3. Aplicaciones en los sistemas transhorizonte

3.1 Tipos de diversidad

Los sistemas existentes utilizan diversidad en el espacio, diversidad angular y diversidad en frecuencia, de manera única o combinadas, para obtener diferentes versiones de la señal transmitida suficientemente no correlacionadas. Para una información más detallada sobre la aplicación de estas técnicas y el cálculo de la calidad obtenida, véase la Recomendación UIT-R F.1101.

3.2 Tipos de combinadores

Los sistemas transhorizonte han utilizado normalmente combinadores después de la demodulación. Los tipos de combinadores en orden decreciente de eficacia son el de relación máxima, el de igualdad de ganancia y el selector. A costa de una reducción de calidad muy ligera (aproximadamente 1 dB para la cuádruple diversidad), la combinación con igualdad de ganancia puede resultar más ventajosa que la combinación con relación máxima, debido a la mayor sencillez del equipo y del mantenimiento. Esta reducción de calidad puede disminuirse aún más si se combinan los métodos de igualdad de ganancia con combinadores del tipo selector. Cuando en la combinación con igualdad de ganancia los niveles de las señales recibidas son muy diferentes, la presencia del receptor que capta la señal más débil puede tener un efecto perjudicial en la calidad de funcionamiento del conjunto; sin embargo, si en estas condiciones se desconecta, la calidad de funcionamiento del conjunto es casi igual a la de un combinador de relación máxima ideal.

4. Aplicaciones en los sistemas con visibilidad directa

El desvanecimiento por caminos múltiples en trayectos con visibilidad directa produce una pérdida de potencia que puede variar de forma selectiva dentro del margen de frecuencias de un radiocanal. Estos dos aspectos, pérdida y dispersión, pueden considerarse separadamente en algunas aplicaciones. Para señales MF y digitales de banda estrecha, la calidad se controla mediante la pérdida de potencia a una sola frecuencia o en una reducida anchura de banda; en muchos sistemas digitales de gran capacidad, la dispersión condiciona la calidad. Debido a la rápida evolución de los sistemas radioeléctricos de gran capacidad, es difícil identificar para un caso determinado qué sistema es sensible sólo a las pérdidas de potencia, cuál lo es sólo a la dispersión y cuál a ambas. Aunque las modulaciones de mayor número de niveles son inherentemente más sensibles a los efectos de la dispersión, los progresos en el diseño de los equipos, tales como los conseguidos con igualadores mejorados, hacen que los sistemas sean menos sensibles a la dispersión.

4.1 Consideraciones sobre la pérdida de potencia de una señal de una sola frecuencia

En los sistemas con visibilidad directa, durante los periodos de desvanecimiento debido a propagación por trayectos múltiples, las señales recibidas por dos antenas receptoras separadas verticalmente sufren rara vez un desvanecimiento intenso simultáneamente. La mejora obtenida con este par de antenas puede definirse como la relación I_0 , en la cual el numerador representa el tiempo durante el cual la señal de la antena receptora principal está por debajo del margen de desvanecimiento, y el denominador, el tiempo durante el cual las señales de las dos antenas se

encuentran simultáneamente por debajo del margen de desvanecimiento. Sea P la fracción de un mes con un gran número de desvanecimientos, durante el cual la señal de un radiocanal no protegido tiene un valor inferior a un margen determinado. En este caso, la fracción del tiempo durante el cual la señal con protección por diversidad en el espacio de dicho enlace tiene un valor inferior a dicho margen de desvanecimiento es P dividido por I_0 , si se utiliza un conmutador perfecto que elija siempre la más intensa de las dos señales recibidas.

Para un conmutador ideal que elija siempre la más intensa de las dos señales recibidas, el factor de mejora por la diversidad en el espacio se ha relacionado empíricamente con el nivel del desvanecimiento, longitud del trayecto, frecuencia y con las ganancias relativas de las antenas para trayectos en los que las reflexiones en el suelo son despreciables.

El factor de mejora obtenido utilizando un combinador puede ser mayor que el de un conmutador ideal debido a la suma coherente de potencia de señal, pero depende del método de control del combinador. Para la combinación con igualdad de ganancia y máxima potencia, en la cual sólo se controla la fase relativa de las señales de entrada, el factor de mejora, teórico en 3/2 veces el de un conmutador ideal.

4.2 Consideraciones sobre la dispersión

Tanto los combinadores como los conmutadores se han utilizado para reducir la incidencia de los efectos del desvanecimiento dispersivo en sistemas digitales de gran capacidad y en sistemas MA de banda lateral única. Para aplicaciones de diversidad en el espacio y angular se han evaluado algoritmos de control de dispersión mínima y de potencia máxima. Los combinadores producen un desplazamiento de fase relativo a las señales de entrada y las suman coherentemente para conseguir su objetivo de diseño: maximizar la potencia de la señal de salida para un combinador de potencia máxima y aplanar la amplitud de la respuesta en la frecuencia de la señal de salida para un combinador de dispersión mínima.

Las aplicaciones de la diversidad de frecuencia utilizan normalmente conmutadores en banda de base para seleccionar, idealmente sin error, la señal con la menor BER.

La evaluación de las técnicas de diversidad para reducir la dispersión se han basado en el funcionamiento observado, o en el funcionamiento parcialmente simulado, de sistemas sometidos a pruebas en condiciones reales, y en pruebas de propagación en las cuales se midió la dispersión de amplitud lineal (LAD) o la diferencia de potencia dentro de banda (IBPD). La LAD es la diferencia, en decibelios, entre la atenuación medida cerca de los dos mínimos del espectro de potencia de la señal; la IBPD es la diferencia, en decibelios, entre la atenuación mayor y menor medida en la anchura de banda de la señal. El uso de la LAD o IBPD está basado en datos de pruebas en condiciones reales que indican una buena correspondencia entre la ocurrencia de dichos valores y de altas proporciones de bits erróneos.

4.3 Evidencia a partir de datos de propagación

Los sistemas existentes utilizan diversidad en el espacio, diversidad angular y diversidad en frecuencia, de manera única o combinadas, para obtener diferentes versiones de la señal transmitida suficientemente incorrelacionadas.

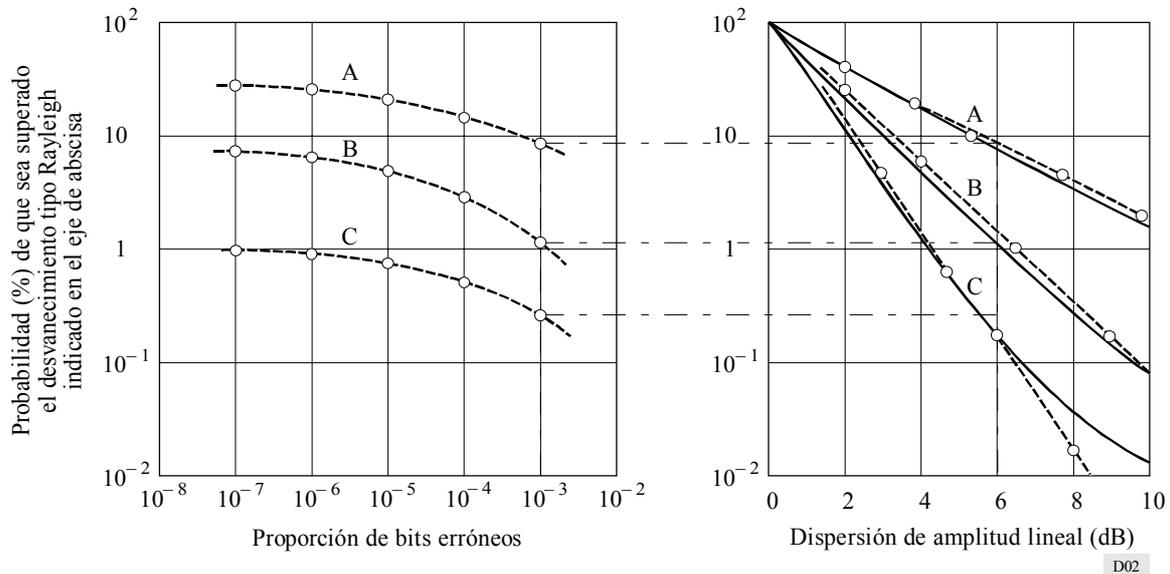
4.3.1 Diversidad en el espacio

En la realización de un experimento se equiparon sistemas radioeléctricos digitales de gran capacidad con combinadores de potencia máxima y de dispersión máxima. El combinador de dispersión mínima determinaba la respuesta en frecuencia midiendo la forma del espectro; si embargo, cuando la señal combinada caía por debajo de un nivel predeterminado, el combinador de dispersión mínima funcionaba como un combinador de potencia máxima. En la fig. 2 se indican los resultados calculados y experimentales con un sistema de modulación MAQ-16, que muestran la mejora de la probabilidad de LAD para funcionamiento con combinadores y sin diversidad.

La realización práctica de la diversidad en el espacio en sistemas de relevadores radioeléctricos con visibilidad directa se ha hecho con separaciones verticales entre antenas normalmente superiores a 5 m, que es la distancia mínima para la que son aplicables las fórmulas del factor de mejora de la diversidad en el espacio cuando se considera el comportamiento a única frecuencia (véase la Recomendación UIT-R PN.530). Aunque dichas fórmulas implican una disminución con menores espaciamentos, resultados recientemente obtenidos indican que se producen mejoras sustanciales con separaciones pequeñas cuando las antenas tienen diferentes diagramas de directividad vertical. Además, una simulación de un sistema radioeléctrico digital sugiere que, incluso cuando las antenas son idénticas, la mejora por diversidad puede que no disminuya uniformemente hasta cero debido a la interacción de los diagramas de radiación de las antenas con el campo incidente. Ya que las diferencias en los diagramas afectan a los factores de mejora a frecuencia única y de mejora por dispersión, la diversidad en el espacio con separación pequeña debe de considerarse como una forma de diversidad por diagrama hasta que se desarrolle una explicación comprensible de los factores de mejora en los distintos casos.

FIGURA 2

Diagrama que muestra el efecto de la diversidad en el espacio sobre la probabilidad de dispersión de amplitud lineal en un sistema de un único tramo de un sistema MAQ-16 (tramo sobre mar de 53 km, en Japón, 5 GHz, 200 Mbit/s, factor de forma («roll-off») 50%, igualador no adaptativo)



- A: Sin diversidad
- B: Combinador de potencia máxima
- C: Combinador de dispersión mínima
- Medido
- Calculado

4.3.2 Diversidad por diagrama o angular

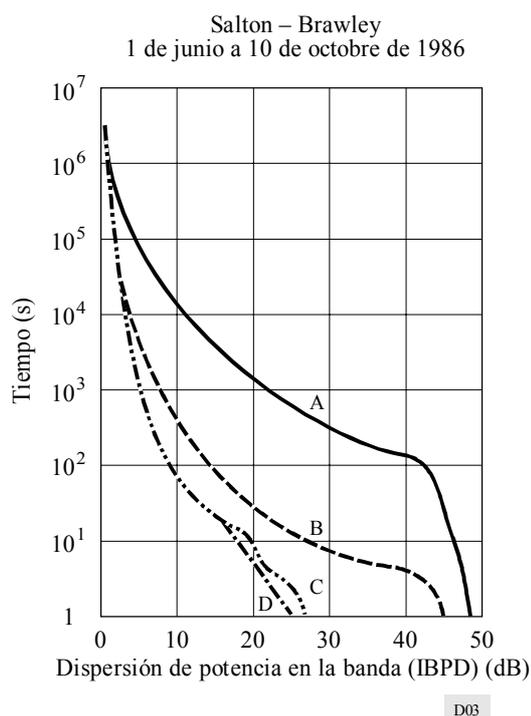
Un estudio reciente, en el que se realizó de forma práctica diversidad por diagrama acoplado dos modos diferentes en una antena receptora de bocina mostró solamente una modesta mejora por diversidad para desvanecimiento a una sola frecuencia utilizando diversidad por conmutación. La posibilidad de obtener una mejora por diversidad significativa y que fue señalada en un experimento en el que se controlaba el funcionamiento con polarización cruzada cocanal de antenas transmisoras y receptoras de sistemas radioeléctricos digitales con modulación MDP-4, se atribuyó a la diferencia entre los diagramas de directividad horizontal y vertical de las antenas transmisora y receptora. Las medidas de la potencia de la señal recibida (una señal digital MDP-8 a 45 Mbit/s y en 7,4 GHz) realizadas en un estudio de un trayecto largo (105 km) sobre agua, mostraron mejoras significativas con respecto a la diversidad angular utilizando una antena de haz doble. En un experimento con dos antenas distintas y con el mismo ángulo de apuntamiento, montadas lado con lado, se obtuvieron mayores mejoras en la reducción de la dispersión por trayectos múltiples (IBPD). Un experimento en el que se midió el desvanecimiento con cuatro haces colocados verticalmente, en una anchura de banda de 90 MHz en 4 GHz sobre un tramo de 45 km, apoya aún más las ventajas de la diversidad angular.

Los resultados de dos experimentos de propagación, concebidos para evaluar la diversidad angular en sistemas radioeléctricos digitales de gran capacidad, apoyan también las ventajas de la diversidad angular. El primero de ellos fue realizado en 6 GHz sobre un trayecto de 60 km en el que se produce una fuerte reflexión en la tierra en condiciones atmosféricas normales. La diversidad angular se realizó con una antena de haz doble que suministraba voltajes suma y diferencia como una pareja de diversidad, y una salida de haz doble como segunda pareja. A efectos de comparación, se comprobó simultáneamente la diversidad espacial con una antena de bocina cónica de 3 m montada 12,8 m por debajo de la antena principal. Las señales de diversidad se obtuvieron utilizando un combinador de máxima potencia, comprobándose el desvanecimiento midiendo la potencia recibida en tres frecuencias. Las distribuciones de la IBPD a la

salida de los combinadores (fig. 3) muestra que, durante el experimento, la IBPD ocurrió menos frecuentemente con cualquiera de las señales de entrada de la diversidad angular que con las entradas de diversidad en el espacio. En periodos posteriores, la diversidad angular redujo el tiempo de interrupción de un sistema radioeléctrico digital con modulación MAQ-64, sobre el mismo trayecto, en un factor de casi 400.

FIGURA 3

Distribuciones que muestran el efecto de la diversidad angular y en el espacio con combinación de potencia máxima sobre la ocurrencia de diferencia de potencia dentro de banda (medida en tres frecuencias en una anchura de banda de 30 MHz) para un trayecto de 60 km con reflexiones en el suelo, en Estados Unidos de América, en 6 GHz

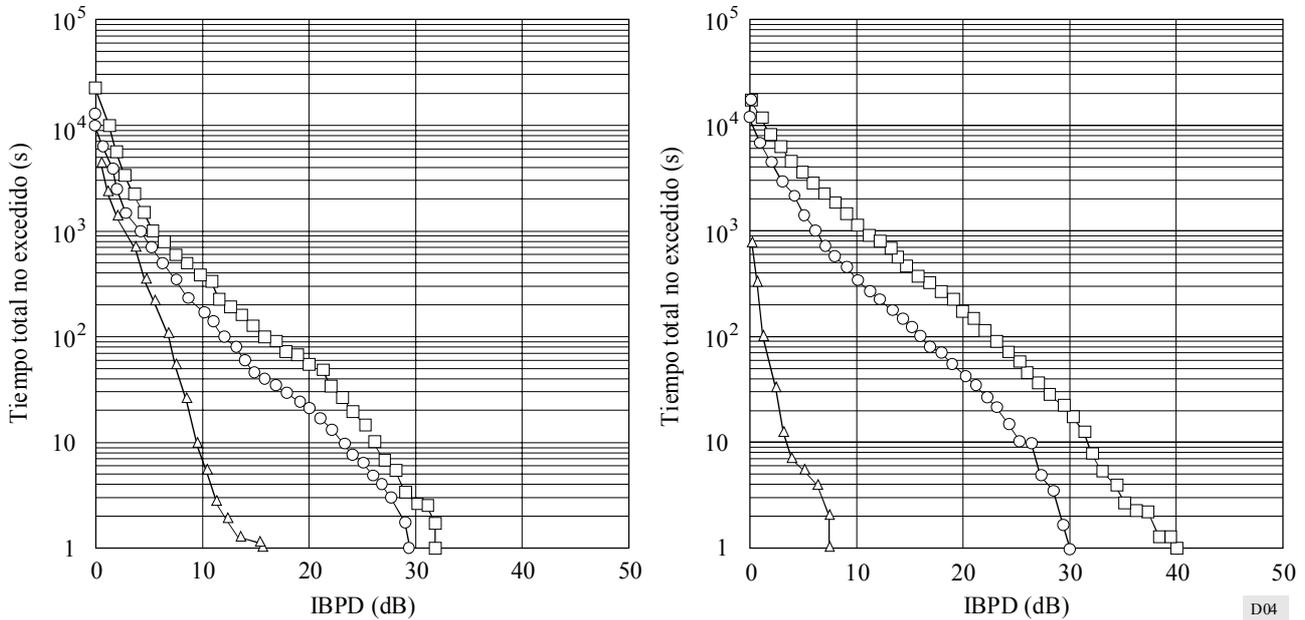


- A: Antena principal, bocina cónica de 3 m
- B: Combinador con antena de diversidad de bocina cónica de 3 m situada 12,8 m debajo de la antena principal
- C: Combinador con las señales suma y diferencia de una parábola de 2,4 m de doble alimentación
- D: Combinador con señales de haz superior e inferior de una parábola de 2,4 m de doble alimentación

Como parte de una serie de experimentos para determinar los efectos de separaciones angulares y espaciales pequeños con antenas idénticas y diferentes en un trayecto de 38 km en Florida, en una de las pruebas se realizó la diversidad angular con dos antenas de bocina piramidales idénticas de 3 m, montadas una al lado de otra. En otro experimento de dicha serie, la señal de diversidad se obtuvo de una segunda antena más pequeña, de 1,8 m, situada en la torre, cerca y debajo de la antena principal. El desvanecimiento se caracterizó mediante la potencia recibida en 16 frecuencias situadas en una anchura de banda de 30 MHz a 6 GHz. La fig. 4 muestra las estadísticas del tiempo de ocurrencia de IBPD para las dos configuraciones. Aunque ambas muestran reducciones importantes en los tiempos de ocurrencia de IBPD, la reducción obtenida con una separación vertical, es significativamente mayor en este experimento.

FIGURA 4

Distribuciones que muestran los efectos de la diversidad con conmutación ideal (dispersión mínima) sobre la ocurrencia de la diferencia de potencia dentro de banda (medida en 16 frecuencias en una anchura de banda de 30 MHz) para un trayecto de 37 km cerca de Gainesville, Florida, Estados Unidos de América, en 6 GHz



a) Antenas idénticas, lado con lado, desplazamiento del ángulo vertical de 1°

- Antena principal, bocina piramidal de 3 m
- Antena de diversidad, bocina piramidal de 3 m
- △ Diversidad con conmutación medida

b) Antenas diferentes, desplazadas verticalmente 3,6 m; ambas con el mismo apuntamiento

- Antena principal, bocina piramidal de 3 m
- Antena de diversidad, bocina cónica de 1,8 m
- △ Diversidad con conmutación medida

D04

Los experimentos de propagación efectuados para comparar la diversidad de espacio y de ángulo, han proporcionado una información ulterior de gran utilidad. En mediciones efectuadas en un trayecto de 55 km próximo a Darmstadt (Alemania), y también en un trayecto de 51 km al Este de Inglaterra se observó que la diversidad de espacio proporcionaba mejor calidad que la diversidad de ángulo. Mediciones efectuadas en un trayecto de 47,8 km en las cercanías de Richardson, Texas (Estados Unidos de América) pusieron de manifiesto que la ventaja de la diversidad de espacio sobre la diversidad de ángulo dependía de la configuración de diversidad de ángulo. Se comportaba mucho mejor una antena de doble haz con el haz inferior dirigido hacia el ángulo de llegada incidente nominal que otra en la que el cruce de haces se dirigía a este ángulo. Por otra parte una configuración que utilizaba señales suma y diferencia, proporcionaba mejores resultados que la disposición de doble haz y alcanzaba casi la misma calidad que la disposición con diversidad de espacio. Estos resultados fueron avalados con datos procedentes de mediciones meteorológicas efectuadas simultáneamente.

Basándose en experimentos efectuados en Alabama y Mississippi, Estados Unidos de América, efectuó comparaciones de la diversidad de diagrama de radiación y diversidad de ángulo con la diversidad de espacio. Los resultados que correspondían a una estación de desvanecimiento en cada ubicación pusieron también de manifiesto una mejora de calidad en el caso de la configuración de doble antena con respecto a la utilización de una antena dirigida por encima del ángulo de llegada nominal así como una ventaja de la diversidad de espacio sobre la diversidad de ángulo. Se atribuyó la ventaja de la diversidad de espacio en este caso a las diferencias entre los márgenes de desvanecimiento de los sistemas radioeléctricos así como a las diferencias de la dispersividad del desvanecimiento en los vanos. Sobre la base de éstos y otros resultados se llegó a la siguiente conclusión: cuando la calidad de funcionamiento de un sistema radioeléctrico digital está condicionada por el efecto de la dispersión, la diversidad de espacio y la diversidad de ángulo ofrecen un comportamiento similar, tanto que cuando predominan los efectos del ruido térmico, la mejor elección es la diversidad de espacio.

En un experimento efectuado a 6 GHz que comprendía un tramo de 124 km con fuerte reflexión desde el lago de Ginebra en Suiza se obtuvieron factores de mejora extraordinariamente altos para diversidad de ángulo y mejoras de un tanto menores para diversidad de espacio.

En un experimento de dos años de duración efectuado en los Países Bajos se observó que la diversidad de ángulo de doble haz aumentaba la mejora si un haz se dirigía por debajo del ángulo nominal de llegada. En esta configuración, la mejora fue casi igual a la mejora por diversidad espacial, medida en siete tramos comparables.

4.3.3 Diversidad de frecuencia

Los resultados experimentales sugieren que la diversidad de frecuencia es una contramedida más eficaz contra la dispersión que afecta a los sistemas digitales que contra las pérdidas de potencia que afectan a los sistemas MF de banda estrecha. En una serie de experimentos, se combinaron pruebas de propagación con medidas del factor de mejora de la diversidad de frecuencia para un sistema radioeléctrico digital con modulación MAQ-16, 90 Mbit/s en la banda de 6 GHz sobre un trayecto de 42 km desde Atlanta a Palmetto en Georgia, Estados Unidos de América. Procesando los datos de las proporciones de bits erróneos de los dos sistemas digitales, que funcionaban en radiocanales con una separación entre las frecuencias centrales de 60 MHz, como entradas de una disposición de diversidad de frecuencia 1 + 1 con un conmutador ideal, los datos de 1980 y 1982 mostraron factores de mejora por diversidad de frecuencia de 100 y 45 respectivamente, con una proporción de bits erróneos de 10^{-3} . Esta mejora es comparable al factor de mejora por diversidad de espacio medida con una separación de antenas de 9 m con los mismos sistemas radioeléctricos sobre dicho trayecto. Por el contrario, técnicas normalizadas basadas en el desvanecimiento a una sola frecuencia, predicen un factor de mejora de 9 para un sistema radioeléctrico analógico MF con un margen contra el desvanecimiento entre 30 y 35 dB.

Un experimento realizado sobre sistemas radioeléctricos a 90 Mbit/s en 6 GHz en un trayecto de 100 km en Wyoming, Estados Unidos de América, mostró de manera semejante mejoras por diversidad de frecuencia que excedían las predicciones para MF en un factor de 10.

En una evaluación experimental de una disposición de diversidad de frecuencia con conmutador múltiple de tipo 3 + 1, se consiguió un factor de reducción de interrupciones de alrededor de 5. Se utilizó equipo radioeléctrico digital MDP-4 de 11 GHz a 140 Mbit/s, instalado en un solo tramo. La mejora, sin embargo, sería menor que la conseguida en la situación más común de un sistema de varios tramos protegido por un conmutador de tipo 5 + 1.

4.3.4 Diversidad cuádruple

Trabajos realizados en Australia para investigar la diversidad cuádruple, ya sea como diversidad cuádruple de espacio o como una combinación de diversidad doble de espacio y doble de frecuencia, y encaminados a satisfacer los objetivos de calidad en materia de disponibilidad y de característica de error para sistemas digitales en la parte de grado alto en trayectos difíciles, en particular en trayectos largos sobre agua, han indicado la obtención de resultados satisfactorios. En el cuadro 1 se incluyen los factores de mejora que se han medido en dos trayectos largos sobre agua utilizados en los experimentos.

También se ha informado de factores de mejora notables conseguidos mediante diversidad cuádruple de espacio sobre trayectos difíciles sometidos a desvanecimiento con corte total.

CUADRO 1

Factores de mejora – Diversidad cuádruple respecto a diversidad doble – Peor mes, mes típico entre paréntesis

	Experimento 1 158 km	Experimento 2 116 km
Segundos con muchos errores	2,6 (15)	6,5 (29)
Minutos de calidad degradada	1,6 (10)	6,2 (30)
Segundos con errores	1,4 (7,4)	3,7 (4,5)
Segundos no disponibles	2,0 (7,0)	25,0 (> 25)

4.4 Estadísticas de dispersión

Los estudios publicados han desarrollado descripciones estadísticas de los efectos dispersivos del desvanecimiento por trayectos múltiples. En la Recomendación UIT-R F.1093 puede encontrarse más información detallada sobre observaciones experimentales y la predicción de la interrupción de sistemas radioeléctricos digitales con técnicas de diversidad en trayectos con visibilidad directa.

En el contexto de los sistemas transhorizonte, se desarrolló una evaluación teórica de las distribuciones, con diversidad y sin ella, de la dispersión de amplitud lineal, suponiendo que las amplitudes individuales tienen distribuciones de Rayleigh. Un estudio más reciente ha desarrollado predicciones de la probabilidad de que la dispersión de amplitud lineal exceda de un valor crítico a la salida tanto de combinadores de potencia máxima como de combinadores de dispersión mínima.

Se han utilizado simulaciones de diversidad de frecuencia con un modelo de tres rayos de banda ancha a fin de obtener una descripción simultánea del desvanecimiento selectivo, en todos los canales de una banda de radiofrecuencia. Para una disposición 1 + 1 este modelo predice que, contrariamente a lo que sucede en aplicaciones de relevadores radioeléctricos analógicos, dentro de ciertos límites, la mejora de la calidad de un sistema radioeléctrico digital tiende a aumentar a medida que disminuye la separación de frecuencia entre los dos radiocanales.
