

RECOMENDACIÓN UIT-R F.1093-2*

Efectos de la propagación multitrayecto en el diseño y funcionamiento de los sistemas inalámbricos fijos digitales con visibilidad directa

(Cuestión UIT-R 122/9)

(1994-1997-2006)

Cometido

En esta Recomendación se proporciona una introducción a los aspectos del diseño y funcionamiento de los sistemas de radioenlaces digitales relativos a la propagación, a partir de la información contenida en los textos de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones y de las mediciones realizadas por las administraciones. En el Anexo 1 se explica el mecanismo del desvanecimiento multitrayecto como factor de propagación dominante en los sistemas de radioenlaces digitales que funcionan en frecuencias por debajo de unos 10 GHz. En otros puntos se examina cómo las técnicas de diversidad y de ecualización adaptativa pueden reducir las degradaciones de los canales.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que el desvanecimiento debido a propagación multitrayecto puede provocar distorsión y atenuación de las señales recibidas en trayectos con visibilidad directa y, por consiguiente, puede degradar la calidad de funcionamiento de los sistemas inalámbricos fijos (FWS);
- b) que en la Recomendación UIT-R P.530 se facilitan los datos y métodos necesarios para la predicción de la propagación de sistemas inalámbricos fijos y la planificación de los trayectos.
- c) que están disponibles diversas medidas para disminuir los efectos del desvanecimiento multitrayecto en la calidad de funcionamiento del sistema;
- d) que para comparar diversas alternativas de diseño se necesitan métodos para analizar los efectos del desvanecimiento multitrayecto en la característica de error de los FWS,

recomienda

- 1 que para mejorar la característica de error se incorporen en el diseño de los sistemas de radiocomunicaciones, cuando sea necesario, medidas contra el desvanecimiento multitrayecto;
- 2 que se utilicen los métodos descritos en el Anexo 1 como orientación en la planificación de los radioenlaces.

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones.

Anexo 1

Efectos de la propagación multitrayecto en el diseño y funcionamiento de los sistemas inalámbricos fijos digitales con visibilidad directa

1 Introducción

El objeto del presente Anexo es proporcionar una introducción a los aspectos del diseño y funcionamiento de los sistemas de radioenlaces digitales relativos a la propagación, a partir de la información contenida en los textos de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones y de las mediciones realizadas por las administraciones. La primera parte del Anexo explica el mecanismo del desvanecimiento multitrayecto como factor de propagación dominante en los sistemas de radioenlaces digitales que funcionan en frecuencias por debajo de unos 10 GHz. En los puntos siguientes se examina cómo las técnicas de diversidad y de ecualización adaptativa pueden reducir las degradaciones de los canales. Por último, se trata la predicción de la calidad de funcionamiento del sistema como resultado de los factores mencionados.

En el Manual sobre sistemas de radioenlaces digitales figura información más detallada sobre la aplicación de las directrices contenidas en este Anexo.

2 Consideraciones sobre la propagación

Los textos elaborados por la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones contienen valiosa información sobre los fenómenos de propagación que deben tenerse en cuenta en el diseño y explotación de los sistemas de radioenlaces. En particular, la Recomendación UIT-R P.530 se refiere especialmente a los «datos de propagación y métodos de predicción requeridos para los sistemas de radioenlaces con visibilidad directa». En dicha Recomendación, se dispone la información de acuerdo con los efectos de propagación que deben considerarse. La información meteorológica pertinente relativa a los mecanismos de propagación aparece en otras Recomendaciones de la Serie P, principalmente las Recomendaciones UIT-R P.834 y UIT-R P.676.

Las condiciones de propagación varían de un mes a otro y de un año a otro y la probabilidad de que se den esas condiciones pueden variar hasta en varios órdenes de magnitud. Por consiguiente, es posible que transcurran entre 3 y 5 años antes de llegar a conclusiones adecuadas sobre los resultados de un experimento de propagación. No obstante, a efectos de la aplicación de sistemas, no se dispone a menudo de ese periodo de tiempo y de ahí que se hayan examinado en la Recomendación UIT-R P.841 algunos modelos de esa variabilidad de ciertos parámetros.

A partir de los datos de propagación se ha llegado a la conclusión de que en un trayecto bien diseñado no sometido al desvanecimiento por difracción o reflexiones en la superficie, la propagación multitrayecto es el factor dominante del desvanecimiento por debajo de 10 GHz. Por encima de esa frecuencia, los efectos de las precipitaciones tienden a determinar cada vez más la longitud del trayecto aceptable en función de los objetivos de interrupción del sistema. La reducción necesaria de la longitud del trayecto al aumentar la frecuencia, suele disminuir la importancia del desvanecimiento debido a la propagación multitrayecto. Estas dos causas principales del desvanecimiento suelen excluirse mutuamente. Dada la divergencia entre los objetivos de disponibilidad y característica de error, los efectos de la precipitación repercuten principalmente en la indisponibilidad y la propagación multitrayecto afecta fundamentalmente a la característica de error. Otro efecto de la precipitación, la retrodispersión debida a la lluvia, puede influir en la elección de la disposición de los radiocanales.

Los efectos de la propagación debidos a diversas formas de precipitación tienden a ser no dispersivos en frecuencia, mientras que los debidos a la propagación multitrayecto causada por capas troposféricas pueden serlo, lo que puede provocar una distorsión importante de las señales que llevan información. El rápido desarrollo de los sistemas de comunicaciones digitales ha exigido un mejor conocimiento de estos efectos y de los métodos para solventarlos.

3 Medidas preventivas contra los efectos de propagación

Hay dos medidas preventivas utilizadas normalmente contra la distorsión de la propagación, técnicas de diversidad y ecualizadores adaptativos de canal, que tratan de corregir las atenuaciones y distorsiones probadas por el medio de propagación. La eficacia de una medida preventiva contra el desvanecimiento suele expresarse en términos de un factor de mejora. En un solo trayecto de prueba, el factor de mejora es la relación entre la duración de las interrupciones observada para un sistema sin la medida preventiva y la observada con ella (véase la Nota 1). Dicho factor de mejora depende del umbral de duración de las interrupciones elegido.

NOTA 1 – La duración de las interrupciones es un término general que se refiere al tiempo durante el cual el sistema rebasa un valor umbral de proporción de bits erróneos (BER) determinado.

3.1 Técnicas de diversidad

Las técnicas de diversidad que se utilizan normalmente son las de diversidad de frecuencias y diversidad de espacio. En las Recomendaciones UIT-R F.752 y UIT-R P.530, así como en el Manual UIT-R – Sistemas de relevadores radioeléctricos digitales, figuran otras técnicas de diversidad.

3.1.1 Diversidad de espacio

La diversidad de espacio es uno de los métodos más eficaces para combatir el desvanecimiento multitrayecto. En el caso de sistemas de radiocomunicaciones digitales, donde los objetivos de calidad de funcionamiento pueden ser difíciles de cumplir debido a las distorsiones de onda provocadas por los efectos de trayectos multitrayecto, el diseño de los sistemas debe basarse a menudo en la utilización de diversidad de espacio.

En los sistemas con diversidad de espacio, las señales recibidas por dos antenas receptoras separadas verticalmente rara vez sufren un desvanecimiento intenso simultáneamente. El factor de mejora que puede lograr un sistema que utiliza estas dos señales depende de los factores de propagación y de la realización del sistema de radiocomunicaciones, es decir su vulnerabilidad a la pérdida de potencia y a la distorsión de las señales multitrayecto y su método de procesarlas. Al evaluar las mejoras que pueden obtenerse con la diversidad de espacio, la práctica aceptada ha sido utilizar la formulación del factor de mejora del desvanecimiento a una sola frecuencia indicado en la Recomendación UIT-R P.530 o formulaciones similares verificadas para su aplicación regional, especialmente en consideraciones de ruido térmico al calcular las probabilidades de interrupción (véase el § 4).

Reduciendo la incidencia efectiva de la profundidad de desvanecimiento, la diversidad de espacio puede disminuir los efectos de diversos tipos de interferencia. En particular, la interferencia a corto plazo causada por los canales con polarización cruzada en la misma frecuencia o en frecuencias del canal adyacente, la interferencia procedente de otros sistemas y la interferencia causada por el propio sistema.

La dispersión de amplitud lineal (LAD) es una causa importante de la distorsión de la onda y de los efectos de diafonía en cuadratura; puede reducirse utilizando diversidad de espacio. Entre los métodos particularmente eficaces para combatir esta distorsión cabe citar el de combinación de

diversidad, diseñado específicamente para minimizar la LAD (véase la Recomendación UIT-R F.752).

La mejora obtenida por la diversidad de espacio dependerá de la forma de procesar las dos señales en el receptor. Dos ejemplos de técnicas son la conmutación sin transición brusca y la combinación de fase variable (véase la Recomendación UIT-R F.752). El conmutador sin transición brusca conmuta al receptor que tiene la mayor abertura del diagrama en ojo o la menor proporción de errores y los combinadores utilizan la dispersión cofásica o diversos tipos de dispersión que minimizan los algoritmos de control. La conmutación sin transición brusca y la combinación cofásica proporcionan factores de mejora muy parecidos.

3.1.2 Diversidad de frecuencias

La mejora por diversidad de frecuencias en un vano de radiocomunicaciones digitales con una configuración 1 + 1 depende de la correlación de las degradaciones (por ejemplo, profundidad de desvanecimiento, dispersión de amplitud y retardo de grupo) en los dos radiocanales. Algunos resultados experimentales revelan una baja correlación de la dispersión de amplitud entre dos canales con anchura de 30 MHz separados por una banda de 60 MHz. El factor de mejora más importante por diversidad de frecuencias se logra normalmente utilizando diversidad de frecuencias en banda cruzada.

En los sistemas $N + 1$ el factor de mejora debido a la diversidad de frecuencias aplicable a un canal en servicio decrece a medida que aumenta el número de canales. Al considerar el empleo de la diversidad de frecuencias con una sección de conmutación de múltiples saltos, debe tenerse en cuenta que el factor de mejora debido a la diversidad de frecuencias depende tanto de la correlación de la degradación entre los radiocanales en un mismo tramo como de la de los tramos de la misma sección de conmutación.

Para lograr la mejora prevista de la diversidad de frecuencias en los sistemas de radiocomunicaciones digitales, el sistema de conmutación debe funcionar en modo sin transiciones bruscas. Además, el procedimiento de conmutación global debe completarse antes de que aparezca una degradación significativa en el canal de tráfico. A esos efectos conviene lograr un tiempo de respuesta de unos 10 ms o menos.

3.2 Ecuación adaptativa de los canales

Normalmente, el radiocanal necesita algún tipo de ecuación en recepción. El ecualizador debe controlarse de forma adaptativa para seguir las variaciones de las características de transmisión a medida que varían las condiciones de propagación. Las técnicas de ecuación utilizadas pueden clasificarse en dos grupos, dependiendo de que su modo de funcionamiento se describa de forma más natural en el dominio de la frecuencia o en el dominio del tiempo: «ecuación en el dominio de la frecuencia» y «ecuación en el dominio del tiempo».

3.2.1 Ecuación en el dominio de la frecuencia

Este tipo de ecualizador comprende una o más redes lineales diseñadas para producir respuestas de amplitud y de retardo de grupo que compensen las degradaciones de transmisión que se considera que provocarán más probablemente una degradación de la calidad de funcionamiento del sistema durante periodos de desvanecimiento multitrayecto..

3.2.2 Ecuación en el dominio del tiempo

Para los sistemas digitales, el procesamiento de la señal en el dominio del tiempo puede considerarse la técnica de ecuación más natural, puesto que trata de combatir directamente la interferencia entre símbolos. La información de control se obtiene correlacionando la interferencia que aparece en el instante de la decisión con los diversos símbolos adyacentes que la producen, y se

utiliza para ajustar redes de línea de retardo con tomas a fin de proporcionar señales de supresión apropiadas. Este tipo de ecualizador tiene la capacidad de tratar simultánea e independientemente las distorsiones producidas por las desviaciones de amplitud y de retardo de grupo en el canal con desvanecimiento, proporcionando así compensación para las características de fase mínima o de fase no mínima.

En los sistemas que emplean modulación en cuadratura, se sabe que los efectos destructivos importantes del desvanecimiento están asociados con la diafonía generada por asimetrías de canal. En consecuencia, para ser útil, un ecualizador en el dominio del tiempo debe ser capaz de proporcionar los medios para compensar la distorsión en cuadratura.

3.2.3 Factores que permiten mejorar la calidad de funcionamiento

Las interrupciones de los sistemas radioeléctricos digitales vienen causadas por una combinación de tres degradaciones principales: interferencia, ruido térmico y distorsión de la onda. Normalmente la ecualización sólo es eficaz contra la última de estas degradaciones. En consecuencia, al considerar las mejoras de la calidad de funcionamiento asociadas con la utilización de ecualizadores adaptativos, es evidente que las mayores reducciones del tiempo de interrupción se producirán en tramos en los que se sabe que la causa principal del fallo del sistema es la distorsión de la señal.

3.3 Ecualización adaptativa en combinación con la diversidad de espacio

Combinando la ecualización adaptativa de canal con la diversidad de espacio pueden lograrse reducciones espectaculares de la interrupción multitrayecto. La mejora en el tiempo de interrupción total medida normalmente rebasa el producto de las mejoras individuales correspondientes obtenidas por separado con la diversidad de espacio y la ecualización, lo que demuestra que se realiza una importante interacción sinérgica.

La mejora con la diversidad de espacio junto con la ecualización es aproximadamente igual al producto de la mejora lograda con la diversidad de espacio por el cuadrado de la mejora obtenida con el ecualizador. Esto es especialmente cierto en el caso de diversidad conmutada.

3.4 Consideraciones en el diseño del sistema en presencia de conductos de propagación

Se sabe que existen conductos en ciertas zonas geográficas con elevaciones de 1 000 m y superiores. Cuando se conoce la existencia de conductos y deben explotarse sistemas de radioenlaces digitales por microondas, debe prestarse la debida atención a los siguientes factores en el diseño del sistema:

- puntería y posición de la antena,
- anchura de haz de la antena necesaria para minimizar la cantidad de energía radiada hacia las capas de reflexión y la cantidad de energía recibida de dichas capas y de la superficie,
- tipo de modulación utilizada para aumentar la duración de símbolo,
- geometría del trayecto necesaria para minimizar la probabilidad de aparición de reflexiones destructivas.

4 Cálculo de la probabilidad de interrupción

En los sistemas digitales, las interrupciones están causadas por distorsión de la onda debida al desvanecimiento selectivo en frecuencia, a la interferencia y al ruido térmico. El tiempo total de interrupción dependerá de estos tres factores. En este punto se examinan brevemente diversos métodos para calcular el tiempo de interrupción en los sistemas digitales. Los parámetros típicos de partida para la aplicación de estos métodos son los siguientes:

- longitud del trayecto,

- frecuencia de funcionamiento,
- diagrama de radiación de la antena,
- parámetros de diversidad,
- irregularidad de la superficie,
- despejamiento del trayecto,
- zona climática.

El método convencional de calcular los tiempos de interrupción en los sistemas analógicos se basa en el concepto de desvanecimientos a una sola frecuencia y, por consiguiente, no se puede aplicar directamente a sistemas de radioenlaces digitales de alta capacidad. Un aumento en el margen de desvanecimiento, que en los sistemas analógicos tenderá a reducir el efecto del ruido térmico, no mejorará la calidad de funcionamiento de los sistemas digitales si el desvanecimiento multitrayecto ya ha colapsado la amplitud del diagrama en ojo al valor cero. En consecuencia no puede utilizarse el aumento de la potencia del transmisor como el único medio para lograr que los sistemas radioeléctricos digitales satisfagan sus requisitos de interrupción.

En la elaboración de métodos de predicción de interrupciones se han aplicado tres enfoques generales: los métodos de margen contra los desvanecimientos, los métodos de las curvas de firmas y los métodos que utilizan la LAD. Aún no se dispone de datos suficientes para determinar si uno de los enfoques es claramente superior a los otros. No obstante, en la Recomendación UIT-R P.530 se presentan paso a paso una serie de métodos para sistemas con y sin protección (espacio, frecuencia y ángulo de diversidad), incluidos los sistemas cocanal de doble polarización. La disminución de calidad de funcionamiento debida a la distorsión se calcula mediante el enfoque de medición de firmas. Se recomiendan los métodos de la Recomendación UIT-R P.530, a menos que se disponga en la región considerada de otros métodos más precisos.

Con objeto de aclarar los enfoques generales y las numerosas variaciones disponibles en diversos países y regiones, se ofrece una descripción de ellos en los puntos siguientes.

4.1 Métodos de margen contra los desvanecimientos

La utilización de márgenes contra el desvanecimiento como característica del sistema se deriva de la bien conocida ley para el desvanecimiento multitrayecto en una sola frecuencia. El tiempo, T , en un mes de desvanecimientos intensos en que el nivel de la tensión recibida es igual o inferior a L , con respecto al valor unidad en el espacio libre, viene dado por la expresión $T = AL^2$, siendo A una constante de proporcionalidad determinada por el número de segundos en un mes y por las características del trayecto.

La calidad de funcionamiento de los sistemas radioeléctricos digitales no viene determinada únicamente por el margen de desvanecimiento térmico; debe utilizarse el concepto de margen de desvanecimiento «neto» o «efectivo» para los sistemas digitales. Sustituyendo el margen de desvanecimiento neto por el margen de desvanecimiento térmico, el tiempo de interrupción en el tramo puede obtenerse aproximadamente a partir de la Recomendación UIT-R P.530. El margen de desvanecimiento «neto» se define como la profundidad de desvanecimiento (dB) a una sola frecuencia rebasada durante el mismo número de segundos que una BER de, por ejemplo, 1×10^{-3} .

4.2 Métodos de las curvas de firmas

Las firmas pueden utilizarse para calcular las interrupciones y comparar la sensibilidad relativa de los distintos sistemas radioeléctricos digitales con respecto a los efectos del desvanecimiento selectivo en frecuencia.

4.2.1 Medición de signaturas

Las signaturas pueden medirse aproximando los desvanecimientos reales mediante un simulador de dos rayos. El modelo de tres rayos simplificado tiene la siguiente función de transferencia:

$$H(\omega) = a [1 - b \exp(-j(\omega - \omega_0)\tau)] \quad (1)$$

donde se supone un rayo directo de amplitud unitaria y un rayo de amplitud b , retardado en τ , siendo « a » un factor de proporcionalidad. El punto más bajo de este desvanecimiento está a una distancia f_0 de la frecuencia central del canal y tiene una profundidad $B = -20 \log \lambda$, siendo $\lambda = 1 - b$. La signatura es entonces la curva del valor crítico B_c , en función de f_0 para la proporción de errores que causa interrupción. Aunque algunas administraciones han utilizado para τ un valor de 6,3 ns y las distribuciones estadísticas asociadas para b y f_0 han sido determinadas a partir del estudio de un gran número de casos de desvanecimiento, a veces se miden las signaturas para otros valores de τ . Los desvanecimientos de fase no mínima pueden tenerse en cuenta a través de la ecuación (1) por medio de valores negativos del retardo τ .

Algunos métodos de cálculo de la interrupción suponen que τ es una variable aleatoria continua. Por consiguiente, en esos casos se necesitan reglas de proporcionalidad para estimar la variación de $b_c(\tau)$ con τ . Se han propuesto reglas de proporcionalidad distintas para $b_c(\tau)$. La regla lineal, aplicable únicamente a retardos pequeños, establece que la altura en longitud de onda (λ) es proporcional al retardo τ . También pueden aplicarse reglas de proporcionalidad más precisas.

La anchura de la signatura $W(f_0)$ permanece prácticamente constante en función del retardo, salvo cuando éste se aproxima a cero, en cuyo caso se duplica cuando el retardo se reduce a la mitad.

4.2.2 Parámetro de sistema normalizado (K_n)

El efecto de las características de los equipos se expresa mediante los valores del parámetro del sistema normalizado K_n , evaluando este parámetro a partir de las signaturas medidas del sistema. Desde el punto de vista teórico puede considerarse que los parámetros del sistema normalizados se evalúan a partir de una «signatura del sistema normalizada». Si se establece una proporcionalidad entre la signatura del sistema con el periodo de símbolos especificado (1 ns) y el retardo de eco relativo (1 ns), esas signaturas de sistema proporcionalizadas, conocidas como «signaturas normalizadas», constituyen unas características de los parámetros del sistema, como el método de modulación, el factor de reducción y el tipo de ecualizador. Utilizando una aproximación rectangular para la signatura, K_n viene dado por la expresión:

$$K_n = (T^2 \cdot W \cdot \lambda_a) / \tau_r \quad (2)$$

donde:

T : periodo del símbolo (ns)

W : anchura de la signatura (GHz)

λ_a : valor medio de la signatura (lineal) $\lambda_c(f) = 1 - b_c(f)$

τ_r : retardo de referencia para λ_a (ns).

En el Cuadro 1 figuran los valores de K_n para receptores sin ecualización adaptativa. La utilización de ecualizadores transversales adaptativos en banda base mejora la calidad de funcionamiento del sistema de forma que las cifras para la zona de signatura normalizada K_n se reducen normalmente a 1/10, aproximadamente, de los valores señalados en el Cuadro 1.

CUADRO 1

Valores de K_n para diversos métodos de modulación
cuando no se utiliza ecualizador

Método de modulación	K_n
MAQ-64	15,4
MAQ-16	5,5
MDP-8	7,0
MDP-4	1,0
