

RECOMENDACIÓN UIT-R F.1704

Características de los sistemas inalámbricos fijos multipunto a multipunto con topología de red en malla que funcionan en bandas de frecuencias superiores a unos 17 GHz

(Cuestión UIT-R 107/9)

(2005)

Cometido

La presente Recomendación proporciona directrices sobre la configuración y las características del sistema de los sistemas inalámbricos fijos (FWS) multipunto a multipunto (MP-MP) con topología de red en malla que funcionan en las bandas de frecuencias superiores a 17 GHz. El Anexo analiza la mejora de la disponibilidad y la reducción de la potencia transmitida, así como el efecto de la diversidad de rutas y las funciones necesarias para los sistemas MP-MP.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los FWS funcionan en varias bandas de frecuencias superiores a 17 GHz;
- b) que las administraciones están introduciendo varias técnicas para la utilización de estas frecuencias;
- c) que las características de la propagación radioeléctrica por encima de unos 17 GHz vienen determinadas fundamentalmente por los fenómenos de desvanecimiento y absorción debidos a la precipitación y son sólo adecuadas para aplicaciones de sistemas radioeléctricos de corto alcance en países afectados por la lluvia (véase la Recomendación UIT-R P.837);
- d) que es bien sabido que las características de la propagación radioeléctrica en estas frecuencias difieren en algunos aspectos de las de frecuencias más bajas y que algunas de estas diferencias pueden ser explotadas ventajosamente por ciertos tipos de sistemas;
- e) que el diseño de los equipos puede diferir del que se utiliza en bandas de frecuencias más bajas;
- f) que se están utilizando nuevas aplicaciones y configuraciones de red en instalaciones de alta densidad de FWS que funcionan en bandas de frecuencias superiores a unos 17 GHz;
- g) que la elevada concentración de usuarios del servicio en zonas urbanas, suburbanas e industriales exige una instalación de alta densidad de terminales de usuarios en estas zonas;
- h) que los sistemas MP-MP con topología de red en malla pueden ser eficaces debido a la posibilidad de utilizar diversidad de rutas;
- j) que, bajo ciertas condiciones, un sistema MP-MP con topología de red en malla puede considerarse una técnica eficaz para mejorar la disponibilidad y la reducción de la potencia transmitida en instalaciones de FWS que funcionan en bandas de frecuencias superiores a unos 17 GHz,

recomienda

que se utilicen las directrices del Anexo 1 para establecer la configuración y las características de los sistemas MP-MP con topología de red en malla que funcionan en bandas de frecuencias superiores a unos 17 GHz.

Anexo 1

Configuración del sistema y características de los sistemas MP-MP con topología de red en malla que funcionan en bandas de frecuencias superiores a unos 17 GHz

1 Introducción

La utilización de sistemas MP-MP con topología de red en malla se considera un medio eficaz para disminuir la degradación de la calidad de las telecomunicaciones en los FWS que funcionan en bandas de frecuencias superiores a unos 17 GHz. Este Anexo describe de forma general la configuración de los sistemas MP-MP con topología de red en malla y muestra los resultados del análisis cuantitativo realizado sobre la mejora de la disponibilidad y la reducción de la potencia transmitida debidas a la diversidad de ganancia utilizando una topología de red en malla. También se indican los requisitos funcionales del sistema para maximizar el efecto de diversidad de rutas y aparecen ejemplos prácticos de las funciones necesarias. Además, se presentan los resultados experimentales obtenidos en pruebas de funcionamiento real sobre diversidad de ganancias (véase el Apéndice 1 al presente Anexo).

2 Consideraciones generales sobre la configuración del sistema

La Fig. 1 ilustra un ejemplo de sistema MP-MP con topología de red en malla. La red en malla inalámbrica consta de nodos inalámbricos que son emplazamientos de abonado, nodos de retransmisión sin tráfico de origen/terminación o puntos de interfaz (POI, *points of interface*) con otras redes tales como las redes de los proveedores de servicios de Internet (PSI). Un nodo inalámbrico está conectado a otros nodos mediante enlaces inalámbricos. El tráfico de extremo a extremo se cursa a través de una ruta de un solo salto y/o rutas de múltiples saltos. Mientras la ruta de un solo salto consta de un solo enlace inalámbrico, las rutas multisaltos consisten en varios enlaces inalámbricos. La red completa puede considerarse como un sistema MP-MP. Cuando en la red se dispone de al menos una ruta de diversidad, el sistema se denomina específicamente «sistema MP-MP con topología de red en malla».

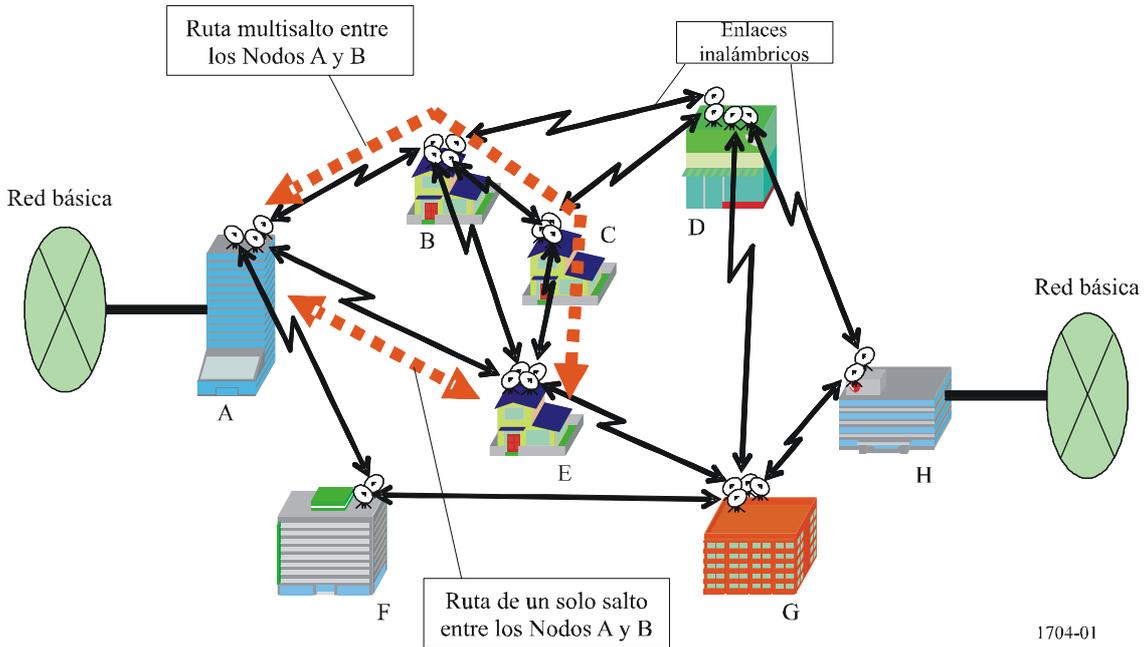
3 Mejora de la disponibilidad y reducción de la potencia transmitida

Los sistemas MP-MP con topología de red en malla tienen capacidad inherente de diversidad de rutas entre un par de nodos. El tráfico de telecomunicaciones de extremo a extremo se dirige de un nodo de origen a un nodo de destino a través de nodos transitorios intermedios y puede haber varias rutas entre el par de nodos de origen y destino. Si uno de los enlaces inalámbricos en una ruta entre un par de nodos de origen y destino pasa al estado indisponible a causa de la atenuación debida a la lluvia, el tráfico de telecomunicaciones en la ruta inalámbrica puede reencaminarse por otras rutas. Debido al efecto de diversidad de rutas, la disponibilidad de las telecomunicaciones de extremo a extremo de la red inalámbrica en malla propuesta puede mejorarse en comparación con la de los sistemas P-P, P-MP o MP-MP convencionales sin topología de red en malla.

Este punto presenta un modelo analítico y varios resultados numéricos del estudio analítico sobre la mejora de disponibilidad y la ganancia de diversidad en los sistemas MP-MP con topología de red en malla. En el modelo analítico, la probabilidad de degradación simultánea de múltiples enlaces a causa de la atenuación debida a la lluvia se expresa mediante la función distribución gamma multivariable con correlación.

FIGURA 1

Ejemplo de sistema MP-MP con topología de red en malla

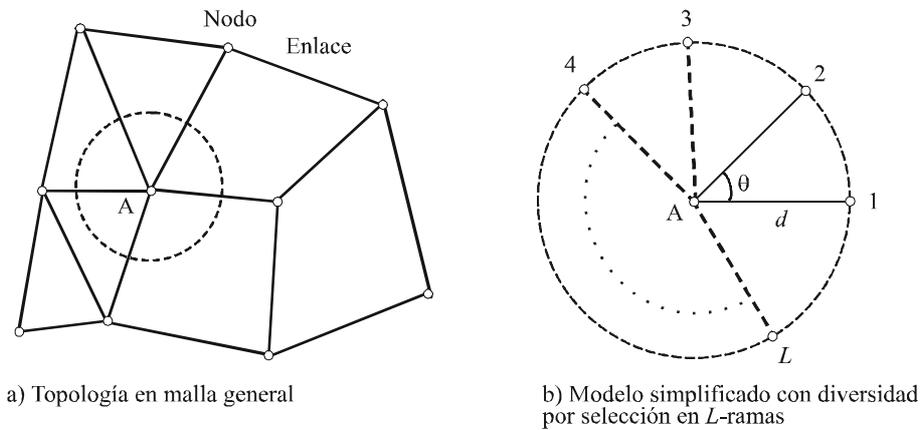


3.1 Modelo analítico

La Fig. 2 representa la red en malla que va a evaluarse. Los múltiples enlaces conectados al Nodo A en una red en malla (véase la Fig. 2 a)) se simplifican mediante un modelo (véase la Fig. 2 b)) donde múltiples enlaces proporcionan una diversidad de L -ramas al Nodo A. En el modelo simplificado, se supone que el ángulo de separación θ entre enlaces adyacentes es idéntico y que todos los enlaces tienen la misma longitud d .

FIGURA 2

Red en malla inalámbrica



3.1.1 Indisponibilidad de nodo

En la Fig. 2 b), el Nodo A pasa a estar indisponible cuando todos los enlaces conectados al nodo se encuentran indisponibles simultáneamente. Por consiguiente, en lo que sigue, la probabilidad de que todos los enlaces que proporcionan diversidad de L -ramas estén indisponibles simultáneamente se denomina «indisponibilidad de nodo (es decir, probabilidad de interrupción)». Sea X_i la variable estocástica para la atenuación debida a la lluvia del i -ésimo enlace y $f(X_i, X_j, \dots, X_k)$ la función densidad de probabilidad conjunta de X_i, X_j, \dots, X_k . La indisponibilidad de nodo $p_{NU}^{(L)}$, que es la probabilidad de que todas las ramas que llegan al nodo estén indisponibles simultáneamente, se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$p_{NU}^{(L)} = p_u^{12\dots L}, \quad (1)$$

donde,

$$p_u^{12\dots L} = \int_x^\infty \dots \int_x^\infty f(X_1, X_2, \dots, X_L) dX_1 dX_2 \dots dX_L \quad (2)$$

Obsérvese que x en esta ecuación representa el umbral de atenuación debida a la lluvia para mantener disponible un enlace inalámbrico. En este caso, se supone que la probabilidad de la atenuación debida a la lluvia para un enlace inalámbrico sigue la distribución gamma y que hay un cierto nivel de correlación entre los niveles de atenuación debida a la lluvia para enlaces inalámbricos. Junto con las distribuciones gamma multivariable con correlaciones arbitrarias, $p_u^{12\dots L}$ se obtiene mediante la ecuación:

$$p_u^{12\dots L} \approx \delta^v \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(v+n)}{\Gamma(v) n!} (1-\delta)^n \left[\frac{\Gamma(v+n, x/\delta)}{\Gamma(v+n)} \right]^L \quad (3)$$

donde:

$\Gamma(a)$: función gamma completa

$\Gamma(a, x)$: función gamma incompleta de segunda clase.

La anterior ecuación es exacta para $L \leq 2$ y aproximada para $L > 2$. El parámetro de forma v tiene un valor típico de aproximadamente 0,005-0,01 en los países afectados por la lluvia en las bandas de ondas milimétricas.

La correlación entre L ramas se representa por $\delta = \det(\mathbf{R})^{\frac{1}{L-1}}$, siendo:

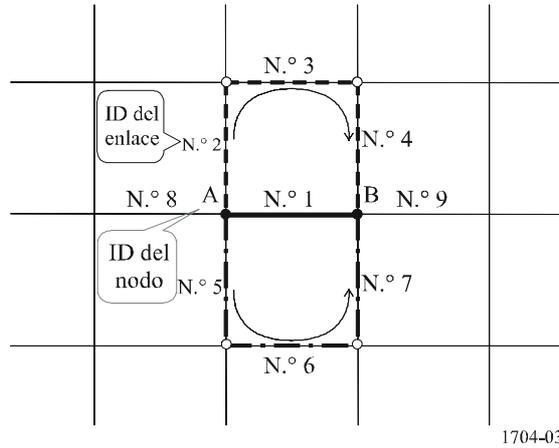
$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & \sqrt{\rho_{12}} & \dots & \sqrt{\rho_{1L}} \\ \sqrt{\rho_{12}} & 1 & \dots & \sqrt{\rho_{2L}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sqrt{\rho_{1L}} & \sqrt{\rho_{2L}} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ρ_{ij} es un coeficiente de correlación entre el i -ésimo y j -ésimo enlaces y puede evaluarse promediando una correlación espacial de la intensidad de lluvia a lo largo de los dos enlaces (mediante una integral doble). Con respecto al coeficiente de correlación espacial de la intensidad de lluvia, se utiliza tradicionalmente la fórmula convencional $\rho_r = \exp(-0,3\sqrt{r})$ siendo r la distancia entre dos emplazamientos (km).

3.1.2 Indisponibilidad de ruta

Para determinar la indisponibilidad de las rutas en las redes en malla, se utiliza un modelo sencillo de rejillas cuadradas como el que se representa en la Fig. 3. Con respecto a la ruta de un solo enlace entre los Nodos A y B existen varias rutas alternativas disponibles. Una de las rutas más cortas, salvo la ruta consistente en un solo enlace entre los Nodos A y B, es la ruta que consta de los enlaces N.º 2, N.º 3 y N.º 4. La otra es la ruta que consiste en los enlaces N.º 5, N.º 6 y N.º 7.

FIGURA 3
Modelo de rejillas cuadradas en una red en malla inalámbrica



1704-03

La indisponibilidad de todas las rutas posibles entre dos nodos recibe el nombre de indisponibilidad de ruta. Considerando únicamente una ruta alternativa entre los Nodos A y B, consistente en los enlaces N.º 2, N.º 3 y N.º 4, distinta de la ruta de un solo enlace (es decir, existen dos rutas en total), la indisponibilidad de ruta entre los Nodos A y B puede obtenerse a partir de la ecuación (5):

$$p_{RU}^{A-B(2)} = 1 - (p_a^1 + p_a^{234} - p_a^{1234}) \quad (5)$$

Obsérvese que el superíndice «A-B(2)» de $p_{RU}^{A-B(2)}$ significa que hay dos rutas entre los Nodos A y B. La variable $p_a^{ij\dots k}$ es la probabilidad de que todos los enlaces i, j, \dots, k estén disponibles, y puede obtenerse a partir de la ecuación (6):

$$p_a^{ij\dots k} = \int_0^x \dots \int_0^x f(X_i, X_j, \dots, X_k) dX_i dX_j \dots dX_k \quad (6)$$

$$\approx \delta^v \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(v+n)}{\Gamma(v)n!} (1-\delta)^n \left[\frac{\gamma(v+n, x/\delta)}{\Gamma(v+n)} \right]^L$$

donde $\gamma(a, x)$ es la función gamma incompleta de primera clase. En la ecuación, L representa el número de enlaces (i.e., i, j, \dots, k) que se considera.

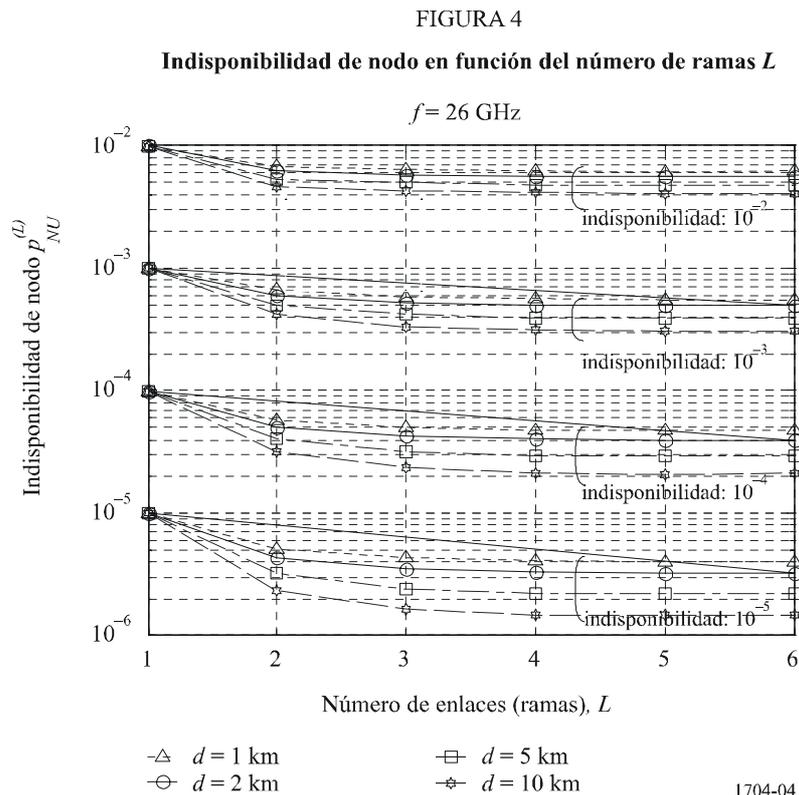
En el caso de que haya dos rutas alternativas (es decir, una ruta consistente en los enlaces N.º 2, N.º 3 y N.º 4, y la otra consistente en los enlaces N.º 5, N.º 6 y N.º 7), la indisponibilidad de ruta entre los Nodos A y B puede obtenerse a partir de la ecuación (7):

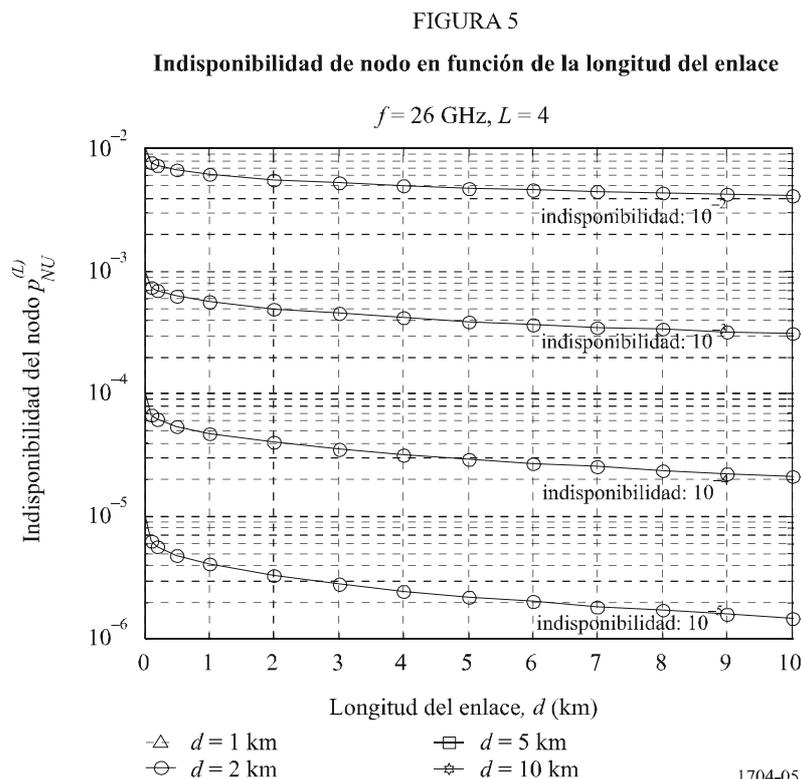
$$p_{RU}^{A-B(3)} = 1 - (p_a^1 + p_a^{234} + p_a^{567} - p_a^{1234} - p_a^{1567} - p_a^{234567} + p_a^{1234567}) \quad (7)$$

3.2 Mejora de la disponibilidad y diversidad de ganancia

Este punto presenta algunos resultados numéricos del estudio analítico en términos de mejora de disponibilidad y diversidad de ganancia, basados en el modelo analítico que aparece en el § 3.1.2. Se supone que la frecuencia de los enlaces inalámbricos es de 26 GHz, salvo en la Fig. 6 que representa la dependencia de la diversidad de ganancia con la frecuencia.

La Fig. 4 muestra la indisponibilidad de nodo en función del número de ramas de diversidad (es decir, enlaces inalámbricos conectados al nodo), L . Se ha dibujado la indisponibilidad de nodo para una indisponibilidad de 10^{-2} - 10^{-5} para cada rama de diversidad. La indisponibilidad de nodo sin ramas de diversidad se indica en el valor $L = 1$. Se observa que un número de ramas superior a 4 proporciona únicamente una mejora marginal. La Fig. 5 muestra la indisponibilidad de nodo en función de la longitud del enlace d para el caso de $L = 4$. Una diversidad de 4 ramas con enlaces radioeléctricos de 2 km al nodo puede reducir la indisponibilidad por un factor de aproximadamente 0,3-0,5 para la disponibilidad especificada de 10^{-2} - 10^{-5} . A medida que aumenta la longitud del enlace, disminuye la correlación espacial de la atenuación debida a la lluvia entre enlaces. De acuerdo con ello, la mayor mejora de la indisponibilidad de nodo se logra debido al mayor efecto de diversidad.





La Fig. 6a) muestra la diversidad de ganancia en función de la longitud del enlace, d , en caso de $L = 4$. La diversidad de ganancia, que contribuye al aumento del margen en el balance del enlace puede contribuir asimismo a reducir la potencia transmitida, a la utilización de una antena más pequeña de ganancia inferior o a facilitar el diseño del sistema receptor disminuyendo el factor de ruido. En la Figura puede verse que la diversidad de ganancia aumenta casi linealmente a medida que se incrementa la longitud del enlace. Cuanto más pequeña es la indisponibilidad de nodo $p_{NU}^{(L)}$, mayor diversidad de ganancia puede lograrse. De la Fig. 6b), también puede deducirse que la diversidad de ganancia es mayor a medida que aumenta la frecuencia.

La Fig. 7 muestra la indisponibilidad de ruta en función de la longitud del enlace d . Se da por hecho que contar con más rutas hace disminuir la indisponibilidad de ruta. En la Figura también aparece el límite inferior de la indisponibilidad de ruta. Dicho límite se determina a partir de la hipótesis de que existe un número infinito de rutas disponibles entre los Nodos A y B en la Fig. 3 y se obtiene a partir de la ecuación (8):

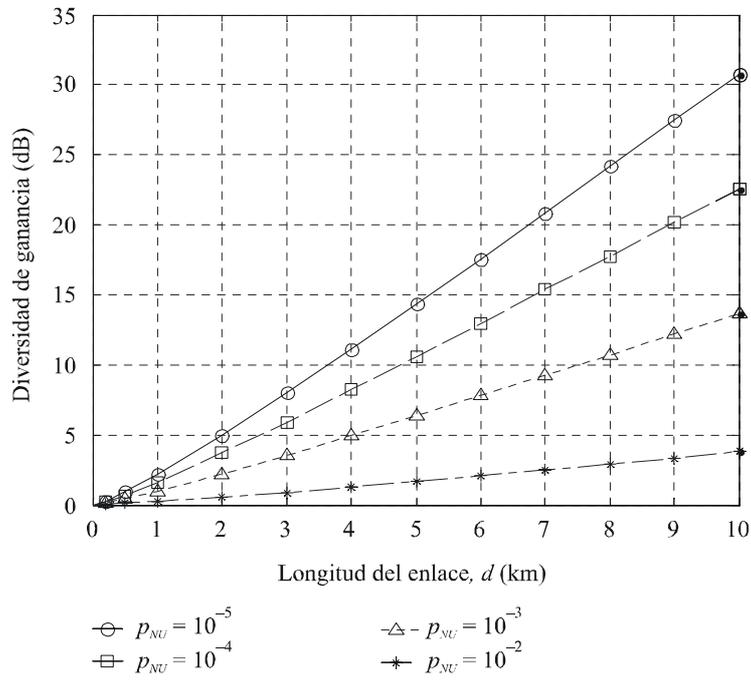
$$p_{RU}^{A-B(\infty)} = p_u^{1258} + p_u^{1479} - p_u^{1245789} \quad (8)$$

Con la ecuación (8) se obtiene la probabilidad de que cualquiera de los nodos (es decir, el Nodo A o el Nodo B) estén indisponibles.

FIGURA 6

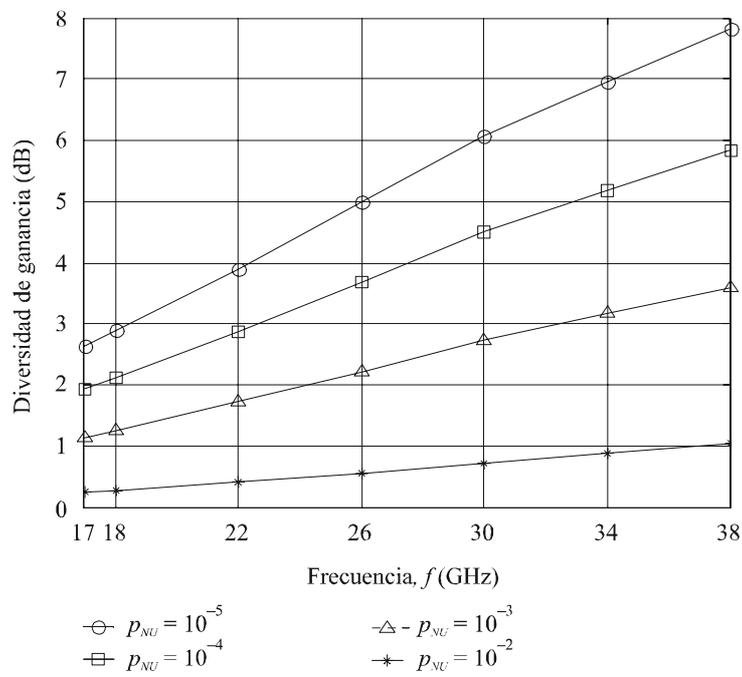
Diversidad de ganancia de la topología de red en malla en términos de indisponibilidad de nodo

$f = 26 \text{ GHz}, L = 4$



a) Diversidad de ganancia en función de la longitud del enlace

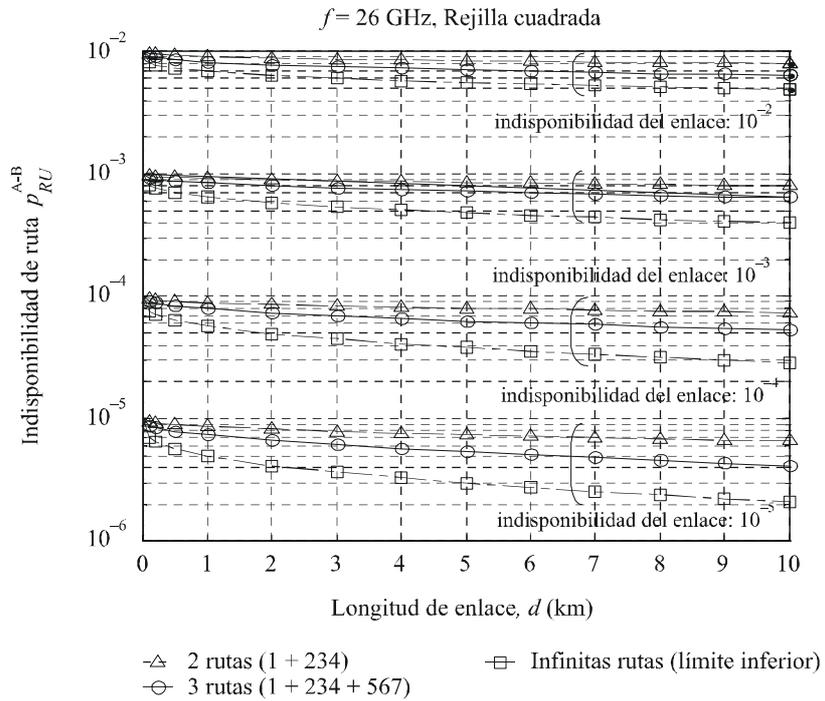
$d = 2 \text{ km}, L = 4$



b) Diversidad de ganancia en función de la banda de frecuencias

FIGURA 7

Indisponibilidad de ruta en función de la longitud del enlace



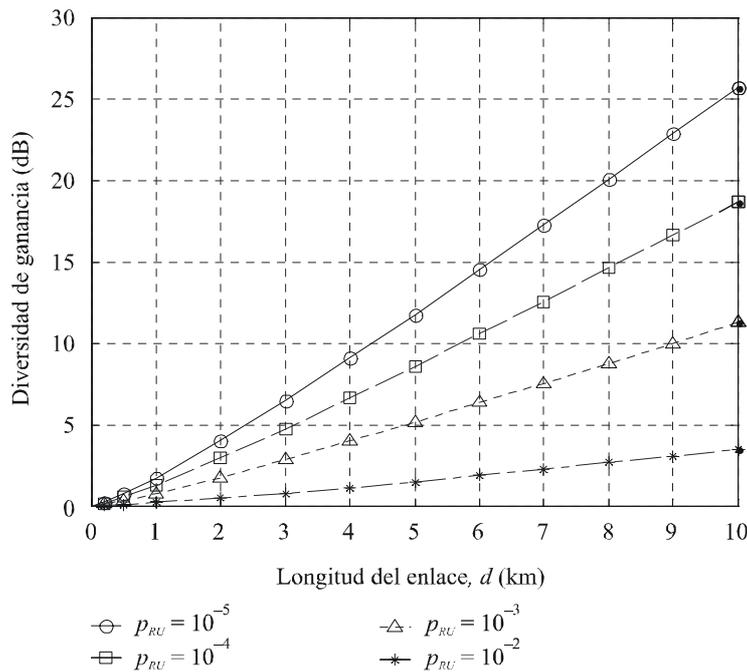
1704-07

Por último, la Fig. 8 muestra la diversidad de ganancia en función de la longitud del enlace, d , en el hipotético caso de un número infinito de rutas disponibles entre los Nodos A y B en la Fig. 3. Así se obtiene el límite superior de la diversidad de ganancia. Este resultado es similar al obtenido en la Fig. 6.

FIGURA 8

Diversidad de ganancia de la topología de red en malla en términos de indisponibilidad de ruta

$f = 26$ GHz, Rejilla cuadrada: infinitas rutas (límite superior)



1704-08

3.3 Resumen de los resultados analíticos

A partir de los resultados anteriores se llega a las siguientes conclusiones:

1. Puede esperarse una importante reducción en la potencia transmitida debida a la diversidad de ganancia. Se espera una disminución de unos 10 dB suponiendo:
 - una longitud del enlace de 4 km,
 - la banda de frecuencias de 26 GHz,
 - una indisponibilidad del enlace de 1×10^{-5} , y
 - una correlación espacial de $\rho_r = \exp(-0,3\sqrt{r})$, siendo r la distancia en kilómetros.
2. Cabe esperar una mayor diversidad de ganancia pues:
 - la indisponibilidad de cada enlace es más pequeño,
 - la longitud del enlace es mayor, y,
 - la banda de frecuencias es más amplia.
3. En términos de efecto de diversidad, 4 ramas (enlaces) por nodo son suficientes.

4 Funciones del sistema necesarias para explotar la diversidad de rutas

4.1 Funciones necesarias

Los sistemas MP-MP con topología de red en malla necesitan soportar las siguientes funciones a fin de potenciar los efectos de la diversidad de rutas tales como la mejora de disponibilidad de ruta y la reducción de la potencia transmitida.

4.1.1 Función de establecimiento de múltiples rutas entre un par de nodos

Para explotar la diversidad de rutas, en la topología en malla física de los sistemas MP-MP se necesita una función de interconexión para establecer múltiples rutas, que incluya rutas multisaltos.

4.1.2 Función de selección de diversidad de rutas

Si una de las rutas configuradas pasa a estar indisponible, el tráfico de telecomunicaciones cursado por esa ruta debe reencaminarse hacia otras rutas disponibles. Por consiguiente, es indispensable contar con una función que seleccione las rutas adecuadas a fin de que no se interrumpan las telecomunicaciones cursadas por dichas rutas. Cabe señalar que podría esperarse una eficacia adicional de las múltiples rutas si se utiliza un mecanismo de equilibrado de la carga de tráfico para mejorar la capacidad del sistema.

4.1.3 Función de gestión de la calidad del enlace

Para utilizar la función de selección de diversidad de rutas, es necesario recopilar información sobre la calidad de los enlaces inalámbricos de la red en malla. A fin de lograr que el traspaso del tráfico de telecomunicaciones entre rutas se produzca sin interrupciones y con objeto de minimizar el periodo de indisponibilidad de los servicios de telecomunicaciones, dicha información debe obtenerse y reflejarse con una frecuencia adecuada y de una manera rápida.

4.2 Ejemplos prácticos para realizar las funciones requeridas

En este punto se presentan ejemplos prácticos para realizar las funciones requeridas mencionadas anteriormente.

4.2.1 Función de establecimiento de múltiples rutas entre un par de nodos

Los protocolos de encaminamiento que se han utilizado en la capa de protocolo Internet (IP) hasta ahora, tales como el primer trayecto más corto abierto (OSPF, *open shortest path fast*) y el protocolo de información de encaminamiento (RIP, *routing information protocol*), seleccionan únicamente una ruta entre el par de nodos constituido por la fuente y el destino. En consecuencia, para cada par de nodos fuente y destino, los encaminadores establecen una ruta determinada por estos protocolos de encaminamiento. Sin embargo, los encaminadores en la arquitectura de red inalámbrica en malla, que se encuentran en cada nodo inalámbrico, deben tener la función de retransmisión de paquetes de datos IP por múltiples rutas.

La tecnología de conmutación por etiquetas multiprotocolo (MPLS, *multiprotocol label switching*) es un método interesante para establecer múltiples rutas porque dicha tecnología tiene la capacidad explícita de dicho establecimiento de múltiples rutas. Dado un conjunto de rutas para cada nodo de salida, utilizando esta tecnología el encaminador en un nodo de ingreso establece trayectos conmutados por etiquetas (LSP, *label switched paths*) relativos a las rutas.

4.2.2 Función de selección de diversidad de rutas

Puede haber varias opciones para seleccionar múltiples rutas entre un par de nodos de ingreso y salida. Desde el punto de vista de la utilización eficaz de los recursos de la red en malla, se necesita un mecanismo de selección de ruta que adopte la tecnología de ingeniería de tráfico. Para lograr dicho objetivo, deben seleccionarse las rutas que minimizan el máximo valor de la carga de tráfico en las propias rutas. Con objeto de determinar las rutas óptimas en términos de ingeniería de tráfico, con un método heurístico propuesto, la demanda de tráfico en cada nodo de ingreso se segmenta en una pequeña parte de la demanda de tráfico y esta pequeña parte de la demanda de tráfico se asigna a una de las rutas disponibles entre los nodos de ingreso y salida, minimizando a la vez la máxima carga de tráfico entre las rutas.

Por otro lado, con objeto de aprovechar las ventajas del efecto diversión en las redes en malla, deben seleccionarse las rutas con pequeña correlación espacial como rutas de diversidad. Una forma de obtener la diversidad de rutas con pequeña correlación espacial es la siguiente.

Paso 1: Se calcula el coeficiente de correlación espacial $r(i, j)$ entre un enlace i en una ruta x y un enlace j en una ruta y diferente a la ruta x .

Paso 2: Se define el coeficiente de correlación espacial $r'(x, y)$ de un par de rutas x e y como $r'(x, y) = \max_{\hat{i}_x} \{ \max_{\hat{j}_y} r(i, j) \}$ y se calcula $r'(x, y)$ para todos los pares de rutas.

Paso 3: Se selecciona la ruta con el mínimo valor de $r'(x, y)$.

Un método de integración de los dos métodos anteriores para determinar la diversidad de rutas consiste en seleccionar la ruta x como la ruta determinada por el método teniendo en cuenta la ingeniería de tráfico. De esa forma, las múltiples rutas entre pares de nodos de ingreso y salida satisfacen el requisito de utilización eficaz de los recursos de la red en malla en condiciones meteorológicas normales (es decir, con la condición de un clima no lluvioso), mientras que la diversidad de rutas con una mínima correlación espacial con las rutas normales es el método utilizado para la desviación del tráfico en climas lluviosos.

4.2.3 Función de gestión de la calidad del enlace

Para hacer el máximo uso de los recursos de la red, debe notificarse a todos los nodos de la red en malla la calidad de los enlaces inalámbricos y la demanda de tráfico inmediatamente después que cambien dichos parámetros de calidad del enlace y demanda de tráfico. Para ello, la calidad de los enlaces inalámbricos conectados a un nodo deberá transferirse desde la unidad de radiocomunicaciones hasta el encaminador del nodo y dicho encaminador debe incorporar una función para supervisar la demanda de tráfico. La transferencia de la información sobre calidad del enlace desde la unidad de radiocomunicaciones puede realizarse conectando una sesión de protocolo de control de transmisión (TCP, *transmission control protocol*) entre la unidad de radiocomunicaciones y el encaminador y ejecutando las telecomunicaciones TCP/IP. Por otro lado, la función de supervisión del tráfico va incorporada normalmente en los encaminadores comerciales.

Además de la función de recopilar la información local en los encaminadores, éstos deben tener una función para intercambiar información sobre enlaces y demanda de tráfico. Una solución consiste en utilizar la «opción LSA opaca» del protocolo del OSPF. Una vez que un encaminador en la red en malla reconoce un cambio en la calidad del enlace inalámbrico o en el volumen de tráfico, la información sobre el cambio se notifica a todos los encaminadores de la red mediante un mecanismo de inundación (véase la Recomendación UIT-T E.360.4). La información intercambiada con otros nodos inalámbricos se almacena en la base de datos de estado del enlace (LSDB).

Apéndice 1 al Anexo 1

Ejemplo de datos obtenidos en experimentos de funcionamiento real sobre el efecto de diversidad de rutas

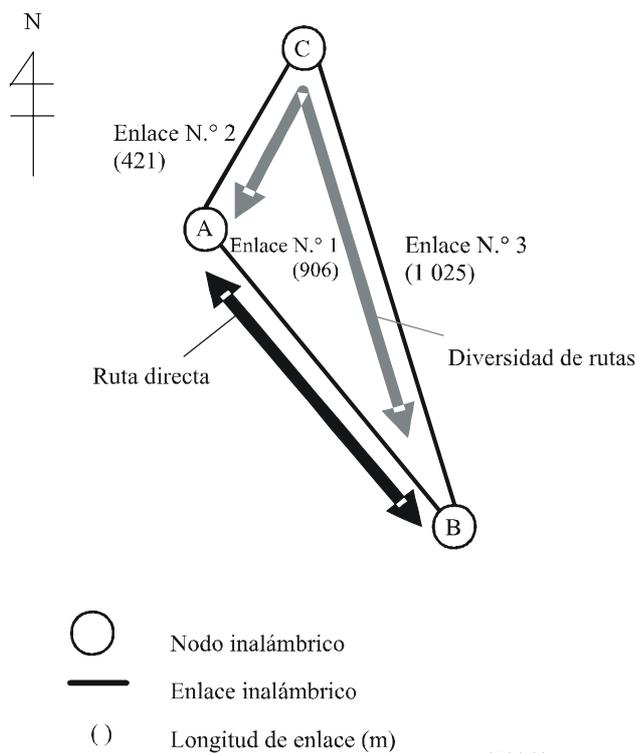
Este Apéndice presenta los resultados de experimentos de funcionamiento real de la atenuación debida a la lluvia producida en enlaces inalámbricos en una red en malla y muestra ejemplos de diversidad de rutas.

1 Red en malla inalámbrica construida y parámetros del sistema

La red en malla ilustrada en la Fig. 9 fue construida en Kamifukuoka, Saitama, Japón, localidad cercana a Tokio. La red en malla inalámbrica utilizada para los experimentos de funcionamiento real consta de tres nodos inalámbricos y tres enlaces inalámbricos. Como se representa en la Fig. 9, el enlace N.º 3 es el más largo de los tres. Un nodo inalámbrico consta de unidades de radiocomunicaciones y de un encaminador inalámbrico, que incorpora las funciones especificadas en el § 4.2 del Anexo 1. En el Cuadro 1 aparecen las principales especificaciones del sistema de las unidades radioeléctricas prototipo. En los enlaces inalámbricos se midieron los niveles de señal recibidos. El intervalo de medición fue de 1 s.

FIGURA 9

Red en malla inalámbrica construida para experimentos en funcionamiento real



1704-09

Es sabido que la atenuación debida a la lluvia disminuye a medida que la longitud del enlace se acorta. Por consiguiente, se da por sentado que una ruta multisalto consistente en enlaces cortos proporciona una atenuación debida a la lluvia de valor bajo en comparación con una ruta de un solo salto que conste de un enlace de gran longitud. En consecuencia, puede esperarse diversidad de ganancia seleccionando una ruta multisalto consistente en enlaces cortos.

Una de las ventajas de las redes en malla es que puede lograrse diversidad de ganancia incluso cuando se selecciona una ruta de diversidad que incluye un enlace largo. En la Fig. 9 se supone que el enlace directo entre los Nodos A y B es el enlace N.º 1, la diversidad de rutas entre el par de nodos consiste en los enlaces N.º 2 y N.º 3, que es el enlace más largo. Este punto se centra en la diversidad de ganancia obtenida utilizando diversidad de rutas.

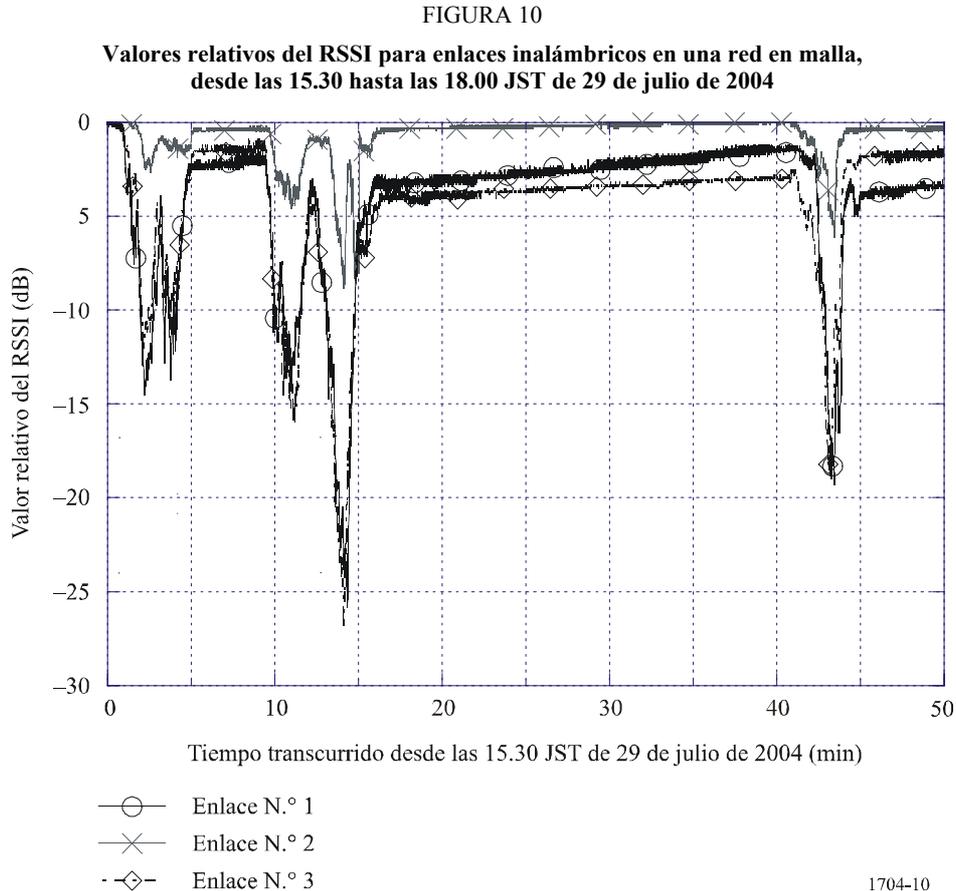
CUADRO 1

Especificaciones principales de la unidades de radiocomunicaciones prototipo

Radiofrecuencia (RF) (GHz)	26,80-26,86
Número de intervalos de frecuencia	7 en la banda de 60 MHz
Separación de los intervalos de frecuencia (MHz)	8,5
Modo dúplex	DDT
Máxima potencia de transmisión por portadora (mW)	50
Ganancia de antena (dBi)	35

2 Datos medidos sobre atenuación debida a la lluvia

En la Fig. 10 se representan las variaciones de los valores relativos del indicador de intensidad de señal recibida (RSSI, *received signal strength indicator*) para cada uno de los enlaces inalámbricos de la red en malla. En las Figs. 10 a 15 la hora de inicio es 15.30 y la de finalización 18.00 JST (hora oficial de Japón) del 29 de julio de 2004, día en que se produjeron lluvias torrenciales con diversos intervalos debido a un tifón.



La Fig. 11 presenta la intensidad de lluvia y la precipitación durante el mismo periodo de tiempo que la Fig. 10. La intensidad de lluvia fue medida con un pluviómetro que produce un impulso cuando se acumulan 0,5 mm de lluvia en su contenedor del pluviómetro, instalado en el Nodo A. Como puede verse en la Fig. 11, el máximo índice de pluviosidad instantáneo que se alcanzó fue cerca de 130 mm/h y se produjeron tres periodos de lluvia intensa durante el periodo. A la vista de las dos Figuras también se confirmó que los niveles de RSSI disminuyeron abruptamente durante los episodios de lluvia torrencial. El máximo nivel de atenuación debida a la lluvia alcanzó un valor superior a 26 dB debido a dicha lluvia torrencial.

FIGURA 12

Ejemplo de ganancia por diversidad de ruta utilizando el enlace más largo

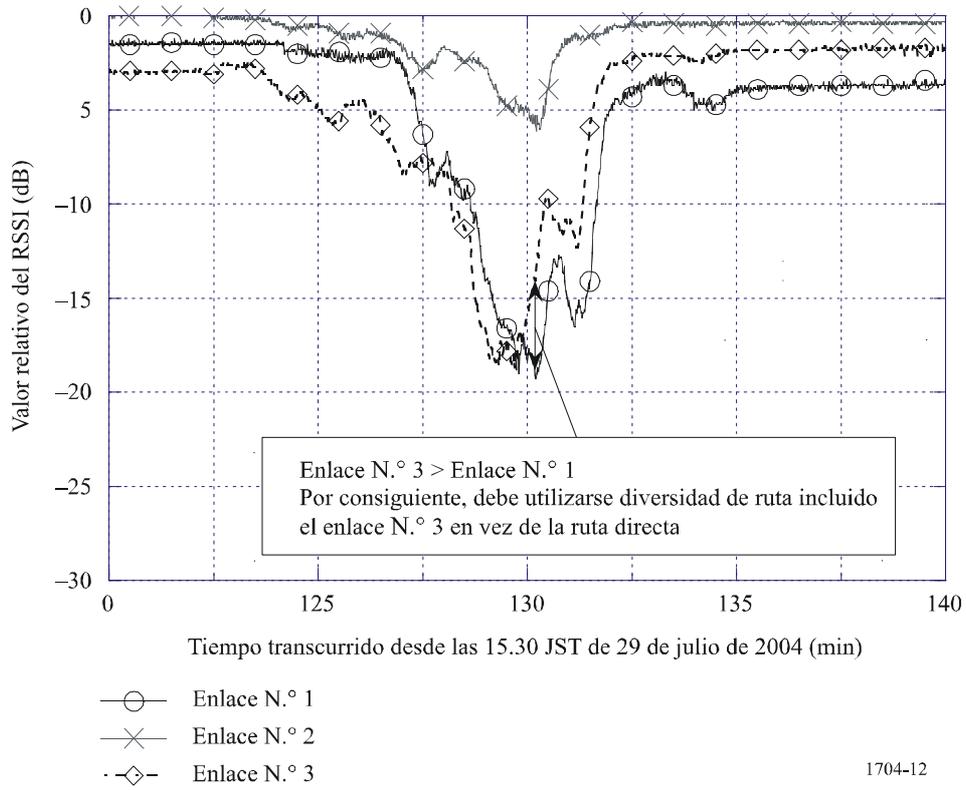
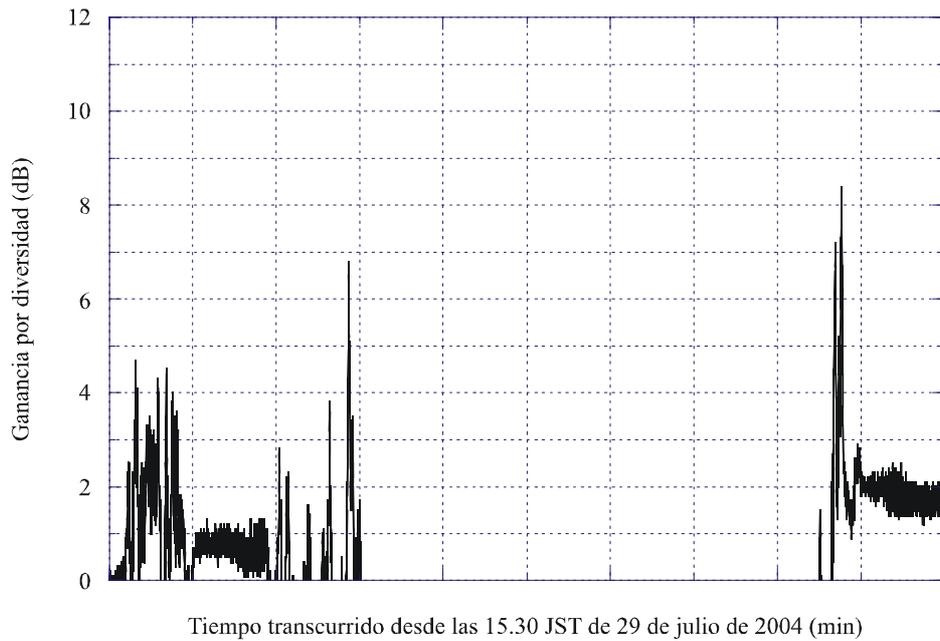


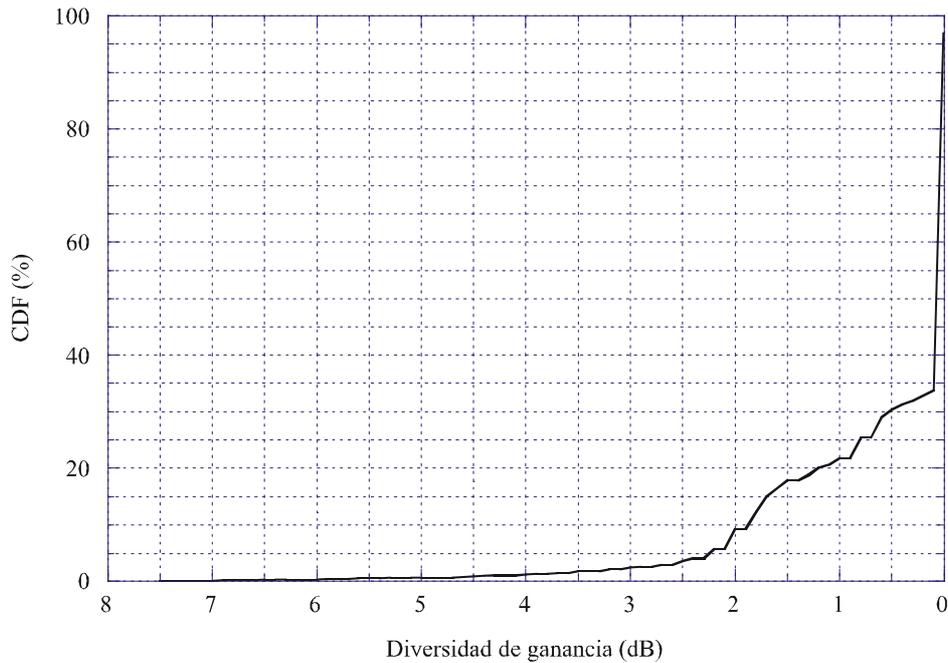
FIGURA 13

Datos de series temporales por diversidad de ganancia desde las 15.30 hasta las 18.00 JST de 29 de julio de 2004



La Fig. 14 presenta la función de distribución acumulativa (CDF) de la diversidad de ganancia. Se obtuvo al menos 1 dB de diversidad de ganancia durante más del 20% del tiempo de medición desde las 15:30 hasta las 18:00 JST de 29 de julio de 2004. La Figura también muestra que se obtuvo al menos 3 dB de diversidad de ganancia durante el 2,4% del intervalo total.

FIGURA 14
CDF de la diversidad de ganancia

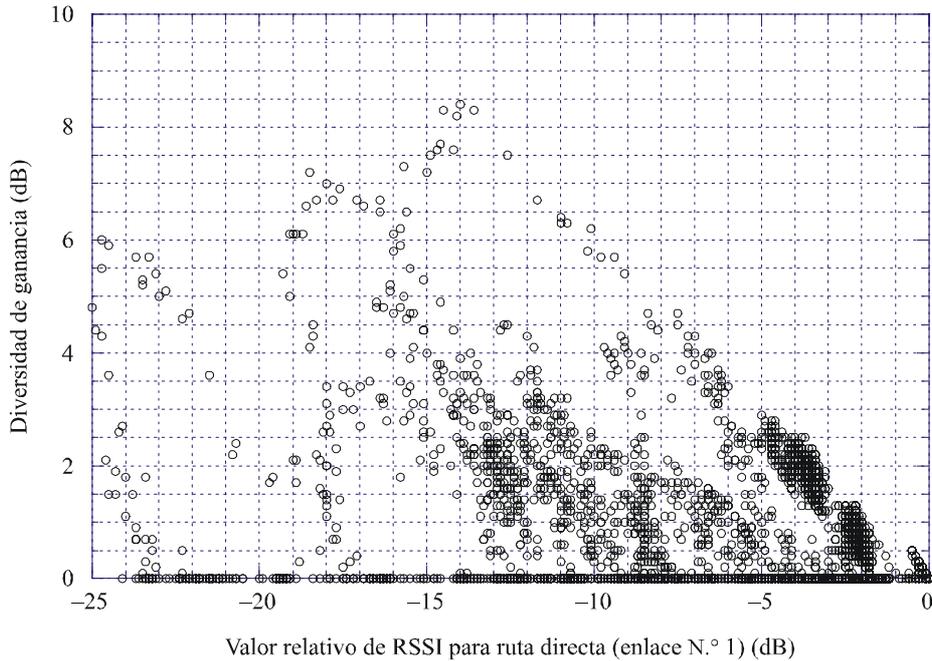


1704-14

Por último, la Fig. 15 representa un diagrama de dispersión sobre la diversidad de ganancia en función del nivel de RSSI de la ruta directa (es decir, el enlace N.º 1) para proporcionar información sobre si puede esperarse el efecto de diversidad en condiciones de elevada atenuación debida a la lluvia. De la Figura puede deducirse que es posible la diversidad de ganancia no sólo en el caso de valores bajos de atenuación debido a la lluvia sino también en el caso de valores elevados de atenuación debida a la lluvia.

FIGURA 15

Diversidad de ganancia en función del valor relativo de RSSI para ruta directa (es decir, enlace N.º 1)



1704-15

3 Resumen de los resultados del efecto de diversidad de rutas durante condiciones de lluvia intensa obtenidos en experimentos en funcionamiento real

De los anteriores resultados experimentales en condiciones reales puede llegarse a las siguientes conclusiones.

- Los resultados experimentales revelaron que se obtiene diversidad de rutas en condiciones de lluvia intensa, incluso para un sistema MP-MP con una pequeña red en malla, que conste de tres enlaces, incluidos enlaces de aproximadamente 1 km de longitud.
- Se obtuvo diversidad de ganancia en particular durante los periodos de elevada atenuación debida a la lluvia.
- En las mediciones experimentales en condiciones de funcionamiento real:
 - se alcanzó un máximo valor de 8 dB como ganancia por diversidad, y
 - se alcanzó al menos 3 dB de ganancia por diversidad durante el 2,4% del periodo de medición.