

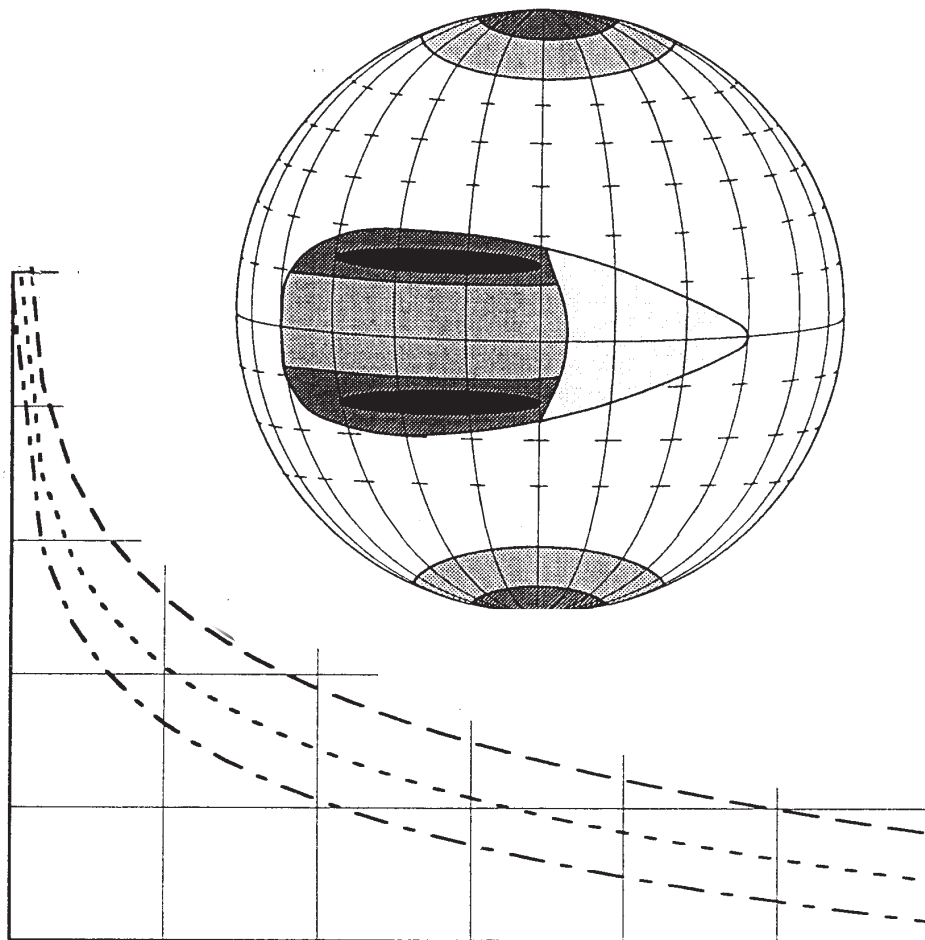


UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

MANUAL

INFORMACIÓN DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS RADIOELÉCTRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE LAS COMUNICACIONES EN LOS TRAYECTOS TIERRA-ESPACIO

MANUAL-PROPAGACIÓN TIERRA-ESPACIO



Oficina de Radiocomunicaciones
Ginebra, 1996

MANUAL

INFORMACIÓN DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS RADIOELÉCTRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE LAS COMUNICACIONES EN LOS TRAYECTOS TIERRA-ESPACIO

PREFACIO

Este Manual ha sido elaborado por expertos del Grupo de Trabajo 3M (Propagación punto a punto y Tierra-espacio) de la Comisión de Estudio 3 del UIT-R (Propagación de las ondas radioeléctricas), bajo la presidencia del Sr. M.P.M. Hall (Reino Unido).

Los autores principales del Manual son:

- Dr. Jeremy Allnutt
- Dr. J.P.V. Poiars Baptista
- Dr. Asoka Dissanayake
- Sr. Glenn Feldhake
- Sra. Fatim Haidara
- Dr. Yoshio Karasawa
- Prof. Marlene Pontes
- Dr. David Rogers
- Sr. Erkki Salonen
- Dr. Haim Soicher
- Sra. Carol Wilson

El Manual ha sido editado por la Sra. Carol Wilson y el Dr. David Rogers.

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN	1
1.1 Relación del presente Manual con las Recomendaciones de la Comisión de Estudio 3 del UIT-R	1
1.2 Aplicación del Manual sobre la propagación Tierra-espacio	2
CAPÍTULO 2 - EFECTOS DE LA TROPOSFERA Y LA IONOSFERA EN LA PROPAGACIÓN	5
CAPÍTULO 3 - PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN	6
3.1 Atenuación debida a los gases atmosféricos	6
3.1.1 Procedimiento para calcular la atenuación gaseosa	6
3.2 Atenuación por la precipitación y las nubes	6
3.2.1 Predicción de las estadísticas de atenuación para un año medio (a partir del índice de pluviosidad en un punto)	6
3.2.1.1 Base del método de predicción de la atenuación por la lluvia	7
3.2.1.2 Longitud de la célula de lluvia equivalente	8
3.2.1.3 Altura efectiva de la lluvia	8
3.2.1.4 Atenuación específica	8
3.2.2 Dependencia a largo plazo con la frecuencia y la polarización de las estadísticas de atenuación por la lluvia	9
3.2.3 Variaciones estacionales - mes más desfavorable	9
3.2.4 Examen de la evaluación del modelo (pruebas)	10
3.2.5 Ejemplo de cálculo	10
3.2.6 Atenuación por las nubes	12
3.3 Diversidad y características espaciales de la lluvia	13
3.3.1 Diversidad de emplazamiento	13
3.3.1.1 Distribución de referencia	15
3.3.1.2 Factor de mejora por diversidad	17
3.3.1.3 Ganancia por diversidad	17
3.3.1.4 Ganancia instantánea por diversidad	17
3.3.1.5 Comparación entre el factor de mejora por diversidad y la ganancia por diversidad como parámetros de medición	18
3.3.1.6 Ejemplo de cálculos utilizando los procedimientos recomendados de predicción con diversidad de emplazamiento	18

3.3.1.7	Factores que influyen en la calidad de funcionamiento con diversidad de emplazamiento	21
3.3.2	Distribución estadística del nivel de la señal en zonas extensas	27
3.3.3	Otros esquemas de diversidad	28
3.3.3.1	Diversidad orbital	28
3.3.3.2	Diversidad de frecuencia	29
3.3.3.3	Diversidad de tiempo	29
3.4	Características de los fenómenos de precipitación	29
3.4.1	Duración de los distintos desvanecimientos	31
3.4.2	Intervalos entre desvanecimientos y entre sucesos	34
3.4.3	Tasas de cambio de la atenuación	36
3.4.4	Correlación entre los valores instantáneos de la atenuación a distintas frecuencias	37
3.5	Efectos de la arena y el polvo	38
3.5.1	Consideraciones generales	38
3.5.2	Categorías de tormentas de polvo	38
3.5.3	Modelos de predicción de las degradaciones en la propagación causadas por el polvo	41
3.5.4	Resultados típicos de la predicción de las degradaciones en la propagación	42
Referencias para el Capítulo 3		44
CAPÍTULO 4 - CONTRIBUCIONES DE LA TEMPERATURA DE RUIDO CELESTE		50
4.1	Efectos de la temperatura de ruido atmosférico en los trayectos Tierra-espacio	50
4.2	Ruido galáctico y otras fuentes de ruido extraterrestre	50
4.3	Ruido procedente de la superficie de la Tierra y de fuentes artificiales	51
4.4	Ejemplo de resolución de un problema	51
Referencias para el Capítulo 4		52
CAPÍTULO 5 - DESPOLARIZACIÓN EN EL TRAYECTO		53
5.1	Introducción	53
5.1.1	Causas físicas de la despolarización	53
5.1.2	Importancia de la despolarización en los sistemas	53

5.1.3	Aislamiento y discriminación por polarización cruzada	54
5.1.4	Estados de la polarización	54
5.1.5	Ortogonalidad y desadaptación de la polarización	56
5.2	Relación entre la despolarización y la atenuación	57
5.2.1	Cálculo de las estadísticas de la XPD a largo plazo	58
5.2.1.1	Despolarización por el hielo	58
5.2.1.2	Dependencia respecto a la frecuencia	59
5.2.1.3	Dependencia respecto al porcentaje de tiempo	60
5.2.2	Dependencia respecto a la configuración del trayecto	61
5.2.3	Evaluaciones de la calidad de funcionamiento del modelo	62
5.2.4	Estadísticas conjuntas de la XPD y la atenuación	62
5.2.5	Dependencia a largo plazo con la frecuencia y la polarización	63
5.3	Dependencia de XPD y XPI respecto a los procesos físicos	63
5.3.1	Rotación de Faraday en la ionosfera	63
5.3.2	Efectos de la precipitación	64
5.3.2.1	Atenuación diferencial	64
5.3.2.2	Fase diferencial	64
5.4	Datos pertinentes sobre la compensación de la polarización cruzada	65
5.5	Incorporación de la XPD en el trayecto en el XPI del sistema	65
5.6	Ejemplo de cálculo de la XPD del trayecto	67
5.6.1	Aplicación del método paso a paso	67
5.6.2	Ejemplo de aplicación de un sistema	69
	Referencias para el Capítulo 5	72
	CAPÍTULO 6 - EFECTOS EN CIELO DESPEJADO	75
6.1	Pérdidas debidas al desenfoque y a la incoherencia del frente de onda	75
6.2	Centelleo y efectos multitrayecto	75
6.2.1	Consideraciones generales	75
6.2.2	Antecedentes del modelo de centelleo	76
6.2.2.1	Variaciones estacionales y diurnas	76
6.2.2.2	Dependencia con la frecuencia	78
6.2.2.3	Dependencia con el ángulo de elevación	79
6.2.2.4	Dependencia con el diámetro de abertura de la antena	79

	Página
6.2.2.5 Función densidad de probabilidad (FDP) de las variaciones en el nivel de la señal	79
6.2.2.6 Dependencia con la polarización	79
6.2.3 Precisión y gama aplicable del método de predicción	80
6.2.3.1 Precisión y aplicabilidad de la predicción de la fluctuación cuadrática media	80
6.2.3.2 Precisión y aplicabilidad de la predicción de la función densidad de probabilidad (FDP)	81
6.2.4 Variaciones de la señal para ángulos de elevación inferiores a unos 5°	81
6.2.4.1 Modelo empírico	82
6.2.4.2 Características del desvanecimiento para ángulos bajos	85
6.3 Retardos de propagación	86
6.4 Ángulo de llegada	87
Referencias para el Capítulo 6	88
CAPÍTULO 7 - PROPAGACIÓN TRANSIONOSFÉRICA	90
7.1 Introducción	90
7.2 Contenido electrónico total (CET)	90
7.3 Efectos debidos a la ionización de fondo	90
7.3.1 Rotación de Faraday	90
7.3.2 Retardo de grupo	91
7.3.3 Dispersión	93
7.3.4 Desplazamiento de frecuencia Doppler	93
7.3.5 Dirección de llegada del rayo	93
7.3.6 Absorción	93
7.3.6.1 Absorción auroral	94
7.3.6.2 Absorción por el casquete polar	94
7.4 Efectos debidos a las irregularidades de la ionización	95
7.4.1 Efectos del centelleo	95
7.4.2 Dependencia geográfica, estacional y solar	96
7.4.3 Modelos de centelleo	97
7.5 Conclusiones	99
Referencias para el Capítulo 7	100

CAPÍTULO 8 - REFLEXIONES EN LA SUPERFICIE Y EFECTOS AMBIENTALES LOCALES (DE INTERÉS PARTICULAR PARA LOS SISTEMAS MÓVILES POR SATÉLITE)		102
8.1	Introducción	102
8.2	Efectos de la superficie de la Tierra	102
8.2.1	Reflexión en la Tierra	103
8.2.1.1	Reflexión especular en una Tierra plana	103
8.2.1.2	Reflexión especular en una Tierra esférica lisa	105
8.2.1.3	Factor de divergencia	106
8.2.1.4	Reflexión en superficies rugosas	106
8.2.1.5	Multitrayecto debido a la reflexión	109
8.2.2	Desvanecimiento debido a la reflexión en la superficie del mar	109
8.2.2.1	Consideraciones generales	109
8.2.2.2	Características de la superficie del mar	109
8.2.2.3	Modelo de cálculo del desvanecimiento	112
8.2.3	Apantallamiento y bloqueo	120
8.2.3.1	Apantallamiento por árboles	120
8.2.3.2	Apantallamiento por edificios	124
8.2.4	Desvanecimiento en el SMAS debido a la reflexión terrestre	127
8.2.5	Interferencia procedente de sistemas de satélites adyacentes	127
8.2.5.1	Consideraciones generales	127
8.2.5.2	Hipótesis básicas del modelo	127
8.2.5.3	Precisión de la predicción.....	129
8.2.6	Ejemplo de resolución de un problema	129
8.2.7	Resultados de las mediciones experimentales	133
8.2.7.1	Mediciones en el SMTS	133
8.2.7.2	Mediciones de los efectos del multitrayecto por reflexión en la superficie del mar	135
8.3	Efectos ambientales locales	136
8.3.1	Contribución del ruido del medio local	137
8.3.2	Bloqueo por la superestructura de los barcos	138
8.3.3	Movimiento de la antena móvil	140
Referencias para el Capítulo 8		141

	Página
CAPÍTULO 9 - MODELO DE LOS EFECTOS COMBINADOS	144
9.1 Adición equiprobable	144
9.2 Convolución	145
9.3 Segmentación temporal	145
9.4 Adición cuadrática	146
9.5 Ejemplo	146
Referencias para el Capítulo 9	148

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Relación del presente Manual con las Recomendaciones de la Comisión de Estudio 3 del UIT-R

El Manual sobre "Datos de propagación de las ondas radioeléctricas para las predicciones de las comunicaciones en el trayecto Tierra-espacio" facilita datos de base y suplementarios sobre los efectos de propagación de las ondas radioeléctricas. Sirve como volumen complementario y guía de las Recomendaciones de las que se ocupa la Comisión de Estudio 3 (CE 3) del Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (UIT-R), con objeto de facilitar el diseño de los sistemas de comunicación Tierra-espacio.

El presente Manual ha de usarse junto con las Recomendaciones de la CE 3 publicadas, con objeto de ayudar al usuario a aplicarlas. Se refiere a las Recomendaciones de la CE 3 que contienen métodos de predicción de las degradaciones y asesoría técnica sobre la propagación de las ondas radioeléctricas para el servicio fijo por satélite (SFS), el servicio de radiodifusión por satélite (SRS), el servicio móvil marítimo por satélite (SMMS), el servicio móvil terrestre por satélite (SMTS) y el servicio móvil aeronáutico por satélite (SMAS). Las versiones de las Recomendaciones correspondientes que se usan en el Manual son las siguientes:

- UIT-R P.618-4: Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio, Ginebra, 1996.
- UIT-R P.679-1: Datos de propagación necesarios para el diseño de sistemas de radiodifusión por satélite, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.680-1: Datos de propagación necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación móviles marítimos Tierra-espacio, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.681-2: Datos de propagación necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación móviles terrestres Tierra-espacio, Ginebra, 1996.
- UIT-R P.682-1: Datos de propagación necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación móviles aeronáuticos Tierra-espacio, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.531-3: Efectos ionosféricos que influyen sobre los sistemas de radiocomunicaciones en que intervienen vehículos espaciales, Ginebra, 1994.

Este Manual está adaptado a las Recomendaciones enunciadas y utiliza la misma terminología y notación. Se hace referencia a los números de ecuaciones en las Recomendaciones para su aplicación como volumen complementario. La duplicación de los datos de propagación procedentes de las Recomendaciones es intencionadamente mínima y los métodos de predicción se hallan en las Recomendaciones. Obviamente, es preferible utilizar la última versión de las Recomendaciones para los cálculos de sistemas.

La correcta aplicación de las Recomendaciones para los servicios Tierra-espacio exige contar con datos radiometeorológicos y de otro tipo procedentes de Recomendaciones adicionales del UIT-R. Además, en el Manual del UIT-R sobre Radiometeorología figura gran cantidad de material de base importante. Las versiones de las restantes Recomendaciones mencionadas en el presente Manual son las siguientes:

- UIT-R P.311-7: Recopilación, presentación y análisis de los datos obtenidos mediante estudios relativos a la propagación troposférica, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.372-6: Ruido radioeléctrico, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.453-5: Índice de refracción radioeléctrica: fórmula y datos sobre refractividad, Ginebra, 1996.
- UIT-R P.526-4: Propagación por difracción, Ginebra, 1996.
- UIT-R P.527-3: Características eléctricas de la superficie de la Tierra, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.530-6: Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa, Ginebra, 1996.
- UIT-R P.581-2: Noción de mes más desfavorable, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.676-2: Atenuación producida por los gases atmosféricos, Ginebra, 1996.
- UIT-R P.834-1: Efectos de la refracción troposférica sobre la propagación de las ondas radioeléctricas, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.836: Densidad del vapor de agua en la superficie, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.837-1: Características de la precipitación para establecer modelos de propagación, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.838: Modelo de atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.839: Modelo de la altura de lluvia para utilizar en los métodos de predicción, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.840-1: Atenuación debida a las nubes y a la niebla, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.841: Conversión de las estadísticas anuales en estadísticas del mes más desfavorable, Ginebra, 1994.
- UIT-R P.1057: Distribuciones de probabilidad para establecer modelos de propagación de las ondas radioeléctricas, Ginebra, 1994.

1.2 Aplicación del Manual sobre la propagación Tierra-espacio

Se necesita información exacta sobre la propagación para que sirva de apoyo al diseño, realización y funcionamiento de la mayoría de los sistemas modernos de comunicación por satélite. El comportamiento de propagación de las ondas radioeléctricas en la ionosfera y en la troposfera cercana a la superficie terrestre, o tras la reflexión sobre la superficie, interesa a los diseñadores de sistemas de telecomunicación que pretendan utilizar un medio de propagación atmosférica para la

transmisión de energía electromagnética entre las antenas del sistema. Las degradaciones de las señales que se producen con intensidad y frecuencia suficientes para afectar a los objetivos de calidad de funcionamiento y disponibilidad deben ser objeto de estimación y tenidas en cuenta en el balance del enlace como parte del diseño de sistema. Así pues, se necesitan métodos que predigan la magnitud y aparición de las degradaciones pertinentes de la propagación, con exactitud suficiente para las aplicaciones de ingeniería.

Este Manual proporciona datos de base sobre las causas físicas de las degradaciones del trayecto, los fundamentos de los métodos de predicción que se hallan en las Recomendaciones y la información adicional que se considera útil para aplicaciones de ingeniería, incluidos datos y modelos que son todavía inapropiados para incluirlos en Recomendaciones. En lo posible, los métodos de predicción están evaluados mediante pruebas con los datos medidos procedentes de los bancos de datos de la CE 3, utilizándose los resultados para indicar la exactitud de los métodos de predicción y la variabilidad de los datos medidos.

El presente Manual se refiere a las degradaciones de la propagación para los sistemas que funcionan por encima de 100 MHz; incluyen todas las atribuciones actuales de frecuencias para los sistemas de satélites.

La importancia de una determinada degradación de la propagación para un sistema de telecomunicación Tierra-espacio depende de la frecuencia y la polarización de la onda, la geometría del trayecto (por ejemplo, el ángulo de elevación del trayecto), los objetivos de calidad de funcionamiento del sistema, los márgenes de calidad de funcionamiento factibles, los detalles de configuración del sistema (por ejemplo, la posibilidad de un funcionamiento de polarización doble), y las características ionosféricas y meteorológicas locales. Por ejemplo, la atenuación por la lluvia es con frecuencia la degradación dominante del trayecto en frecuencias superiores a unos 10 GHz, pero tiene consecuencias despreciables para un sistema móvil por satélite que funcione en 1,5 GHz. Por el contrario, las reflexiones en la superficie, el ensombrecimiento y el bloqueo son de primordial importancia para un sistema móvil, pero rara vez tienen importancia decisiva para un terminal que funcione en el SFS, ya que se puede planear el emplazamiento del terminal a fin de reducir al mínimo tales efectos.

En el cuadro 1.1 se identifican los efectos pertinentes de la propagación y se indican los sistemas en los que dichos efectos revisten una importancia significativa.

Este Manual sobre la propagación Tierra-espacio trata sólo de los efectos de la propagación sobre la señal deseada. Se exceptúa la despolarización del trayecto, que si bien sólo tiene importancia desde el punto de vista de la interferencia (por ejemplo, entre las transmisiones de señales de polarización ortogonal), se examina porque puede guardar relación estadística con las degradaciones de la propagación de la señal directa copolarizada.

Para ajustarse al formato de las Recomendaciones correspondientes, la información se ordena conforme a los parámetros del enlace considerados en el actual sistema de planificación, en lugar de hacerlo de acuerdo con los fenómenos físicos que producen los distintos efectos.

CUADRO 1.1

Degradaciones de la propagación que afectan a los sistemas de comunicaciones por satélite

Degradación	Causas físicas	Sistemas afectados	Frecuencia	Sección del Manual
Atenuación de la señal, aumento del ruido ionosférico	Gases atmosféricos, nubes, precipitación	Todos los tipos de sistemas por satélite	$f >$ unos 10 GHz	3, 4
	Capas ionosféricas bajas		$f <$ 70 MHz	7.3.6
Despolarización de la señal	Gotas de lluvia, cristales de hielo	Sistemas de polarización doble	En 6/4, 14/11 y 30/20 GHz	5
	Rotación de Faraday		Por debajo de 1 GHz aproximadamente	7.3.1
Centelleo de la señal (fase y amplitud)	Variaciones de la refractividad, especialmente en ángulos de elevación bajos (inferiores a unos 10°)	Sistemas de margen bajo, seguimiento de antena, control de potencia en el enlace ascendente	$f >$ unos 10 GHz	6.2
	Variaciones de la refractividad ionosférica		10 MHz - 12 GHz	7.4
Refracción, multitrayecto atmosférico	Gases atmosféricos	Sistemas que funcionan en ángulos de elevación bajos, seguimiento de antena	1 - 45 GHz	6
	Distribución ionosférica de los electrones			7.3.5
Multitrayecto por reflexión, apantallamiento, bloqueo	Objetos, vegetación sobre la superficie de la Tierra	Servicios móviles por satélite		8
Retardos de propagación y variaciones del retardo	Espacio libre, variaciones en la troposfera	AMDT y sistemas de posición-localización; sistemas de control adaptativo de bucle cerrado		6.3
	Contenido electrónico total			7.3.2
Interferencia entre sistemas	Formación de conductos, dispersión por precipitación, difracción	Todos los tipos de sistemas de satélites	Sistemas de 6/4 GHz	8.2.5, (SMS); véase también en el Manual del UIT-R sobre propagación de ondas radioeléctricas, información relativa a predicciones de niveles de la señal que probablemente causan interferencia y relativa a la evaluación de las distancias de coordinación (su publicación está prevista para 1998)
	Dispersión y reflexión ionosférica		$f <$ 300 MHz	
Dispersión	Contenido electrónico total	Sistemas de anchura de banda amplia		7.3.3

CAPÍTULO 2

EFFECTOS DE LA TROPOSFERA Y LA IONOSFERA EN LA PROPAGACIÓN

La Comisión de Estudio 3 trata de los efectos en la propagación en todas las regiones de la atmósfera y el espacio libre, incluida la ionosfera terrestre. La mayor parte del "tiempo" (precipitación) de la Tierra se produce en la troposfera que es una región no ionizada que va desde la superficie hasta una altura de unos 15 km (en el ecuador) por encima de dicha superficie. El espesor de la troposfera disminuye en los polos. Los efectos en la propagación en la troposfera tienden a aumentar en importancia a medida que la frecuencia se eleva por encima de 1 GHz. Para los sistemas móviles por satélite, los efectos de la reflexión sobre la superficie de la Tierra tienen importancia decisiva en frecuencias todavía inferiores.

En frecuencias por debajo de 1 GHz aproximadamente, la región más importante de la atmósfera terrestre es la ionosfera, que es la región ionizada de la atmósfera situada por encima de la estratosfera, en donde son bastante fuertes los efectos en la propagación en frecuencias bajas. Los efectos en la propagación dentro de la ionosfera están examinados detalladamente en el Manual del UIT-R sobre la ionosfera y sus efectos en la propagación de las ondas radioeléctricas terrenales y en los trayectos Tierra-espacio desde la banda de las ondas miriamétricas hasta la banda de las ondas centimétricas. Los efectos de ese tipo que tienen importancia para los trayectos Tierra-espacio se examinan también en el Capítulo 7 del presente Manual.

CAPÍTULO 3

PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN

3.1 Atenuación debida a los gases atmosféricos

Los gases presentes en la atmósfera pueden atenuar las ondas electromagnéticas. Esta atenuación viene provocada por la absorción molecular de los componentes atmosféricos y tiene una fuerte dependencia con la frecuencia. Los causantes principales de esta atenuación por debajo de 70 GHz son el vapor de agua y el oxígeno.

3.1.1 Procedimiento para calcular la atenuación gaseosa

El procedimiento actualmente adoptado de la Recomendación UIT-R P.618 para obtener la atenuación debida a los gases atmosféricos es el que se presenta, en una configuración más sencilla, en la Recomendación UIT-R P.676.

Las ecuaciones (1) a (3) de la Recomendación UIT-R P.618 se basan en la hipótesis de que las densidades de vapor de agua y de oxígeno disminuyen de forma exponencial aunque a velocidades distintas. Esta aproximación de primer orden puede utilizarse para emplazamientos con altitudes inferiores a 1 km.

El procedimiento requiere, como dato de entrada radiometeorológico, la densidad de vapor de agua en la superficie. En ausencia de mediciones locales de este parámetro, puede utilizarse la información que figura en la Recomendación UIT-R P.836.

Para emplazamientos con altitudes superiores a 1 km, o con ángulos de elevación del trayecto oblicuo negativos, deben utilizarse los procedimientos más completos adoptados en la Recomendación UIT-R P.676. Si es necesario realizar una estimación muy precisa de la atenuación debida a los gases debe emplearse la información del anexo 1 de la Recomendación. En este caso, hay que realizar mediciones de los perfiles atmosféricos de presión, temperatura y humedad (por ejemplo, perfiles por radiosondas).

3.2 Atenuación por la precipitación y las nubes

3.2.1 Predicción de las estadísticas de atenuación para un año medio (a partir del índice de pluviosidad en un punto)

La distribución del índice de pluviosidad es heterogénea en el espacio y en el tiempo. Los registros de pluviómetro muestran la aparición de cortos intervalos de índice de pluviosidad elevados durante largos periodos de lluvia más ligera. Las observaciones del radar meteorológico muestran la existencia de pequeñas zonas de índice de pluviosidad alto en el interior de zonas más extensas de pluviosidad ligera. En el Manual de Radiometeorología se describen varios modelos de precipitación elaborados para tratar esas situaciones complejas. Se han propuesto varios métodos para predecir las estadísticas de atenuación por la lluvia a partir de las mediciones del índice de pluviosidad cerca del trayecto. La diferencia principal de los métodos consiste en los modelos utilizados para describir la estructura tiempo-espacio del índice de pluviosidad [Fedi, 1981a].

3.2.1.1 Base del método de predicción de la atenuación por la lluvia

El procedimiento de predicción de la atenuación por la lluvia en el trayecto oblicuo actualmente adoptado en la Recomendación UIT-R P.618 está basado en la estimación de la atenuación rebasada durante el 0,01% del tiempo ($A_{0,01}$) a partir del índice de pluviosidad rebasado durante el mismo porcentaje de tiempo ($R_{0,01}$). El concepto de equiprobabilidad no es coherente con la información meteorológica y no es enteramente satisfactorio desde un punto de vista teórico. Sin embargo, la exactitud obtenida con el método de predicción es coherente con la calidad y variabilidad de los datos de intensidad de la lluvia disponibles.

Para un valor dado del índice de pluviosidad $R_{0,01}$, se calcula la atenuación específica (γ_R) y se multiplica por una longitud de trayecto efectiva (L_{eff}) para obtener el valor correspondiente de $A_{0,01}$. La longitud de trayecto efectiva es el producto de la longitud del trayecto oblicuo, L_s , por un factor de reducción del trayecto ($r_{0,01}$):

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot L_{eff} = \gamma_R \cdot L_s \cdot r_{0,01} \quad (3.1)$$

Se utiliza una expresión empírica para determinar por extrapolación los valores para otros porcentajes de tiempo, con objeto de proporcionar la distribución completa de la atenuación por la lluvia.

El conjunto de expresiones para la estimación de $A_{0,01}$ se basa en dos hipótesis:

- la estructura espacial de la lluvia puede aproximarse mediante un modelo basado en una célula de lluvia equivalente que tenga una sección transversal rectangular, de longitud equivalente L_0 y de altura efectiva $h_R - h_S$ en el plano del trayecto (véase la figura 3.1); y
- la célula de lluvia equivalente puede asumir cualquier posición con respecto al trayecto con igual probabilidad.

La expresión para el factor de reducción del trayecto $r_{0,01}$ dada por la ecuación (8) en la Recomendación UIT-R P.618 es consecuencia de esas dos hipótesis. La longitud efectiva del trayecto, representada por el producto $L_s r_{0,01}$ en la ecuación (10), corresponde a la longitud media del trayecto oblicuo (L_s) dentro de la célula de lluvia equivalente, suponiendo que en todas las células haya un índice de pluviosidad constante.

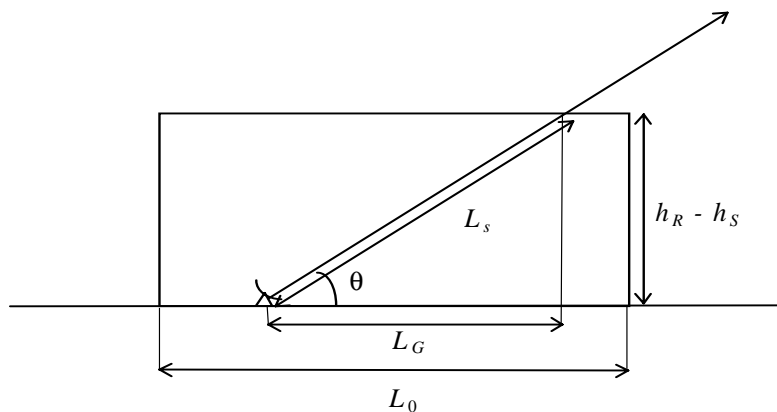


FIGURA 3.1

Célula de lluvia equivalente de un índice de pluviosidad uniforme

3.2.1.2 Longitud de la célula de lluvia equivalente

En la Recomendación UIT-R P.530 se utiliza actualmente el concepto de longitud de trayecto efectiva para tomar en cuenta el perfil no uniforme de la intensidad de la lluvia a lo largo de un trayecto horizontal, a fin de predecir la distribución acumulativa de la atenuación por la lluvia en los enlaces terrenales. En éstos, la longitud del trayecto efectiva es la longitud de un trayecto ficticio obtenido de los datos radioeléctricos, dividiendo la atenuación total por la atenuación específica rebasada durante el mismo porcentaje de tiempo.

En un principio se supuso que la expresión del coeficiente de reducción, relacionada con la longitud del trayecto efectiva y la longitud del trayecto real, dependía sólo de la longitud del trayecto, pero después se ha mejorado suponiendo que depende también de la intensidad de la lluvia [Yamada y otros, 1987] en la longitud de la célula de lluvia equivalente L_0 .

El método adoptado en la Recomendación UIT-R P.618 se desarrolló [Fedi, 1981b] aplicando el coeficiente de reducción elaborado para los enlaces terrenales a la porción del trayecto Tierra-espacio sometida a la lluvia. Se calculó esa porción como la intersección del trayecto con la altura de la isoterma 0°C , para la que se propuso una expresión preliminar en función de la latitud. En la actual versión se ha revisado el método aplicando el mismo coeficiente de reducción adoptado para los enlaces terrenales [Yamada y otros, 1987] sólo a la proyección horizontal de la porción del trayecto Tierra-espacio sometida a la lluvia. Esa porción se calcula como la intersección del trayecto con la altura efectiva de la lluvia.

3.2.1.3 Altura efectiva de la lluvia

Para tomar en cuenta la estructura vertical se han propuesto varias técnicas [Brussaard, 1981]. Algunas de ellas son ampliaciones de las ya elaboradas para los enlaces terrenales [Kalinin, 1976; Morita e Higuti, 1978; Misme y Waldteufel, 1980; Fedi, 1980; Lin, 1980; Rue, 1985; García-López y otros, 1989]. Otras se han deducido basándose en amplios estudios de la estructura de la lluvia [Crane, 1980; Fedi y Paraboni, 1986; Leitao y Watson 1986; Rue, 1988; Li y otros, 1987].

En la versión actual del método de predicción de la Recomendación UIT-R P.618, la estructura vertical de la lluvia se tiene en cuenta utilizando la altura efectiva de la lluvia h_R , deducida de datos experimentales, en la expresión de L_S . En el caso de los trayectos verticales, la longitud efectiva del trayecto coincide con la altura efectiva de la lluvia que, en cualquier latitud, puede diferir de la altura de la isoterma 0°C h_{FR} como se especifica en la Recomendación UIT-R P.839. No se dispone de ninguna información sobre el comportamiento de la relación h_R/h_{FR} en distintas latitudes. Sin embargo, recientes trabajos llevados a cabo por la CE 3 sugieren que sería conveniente utilizar h_{FR} como altura efectiva de la lluvia en el modelo.

3.2.1.4 Atenuación específica

Para las aplicaciones prácticas, la relación entre la atenuación específica γ_R (dB/km) y el índice de pluviosidad R (mm/h) puede obtenerse aproximadamente por una ley exponencial [Olsen y otros, 1978], dada por la ecuación (9) en la Recomendación UIT-R P.618. Basándose en la hipótesis de gotas esféricas se han calculado los valores de k y α en ciertas frecuencias comprendidas entre 1 y 1 000 GHz para varias distribuciones de las temperaturas y los tamaños de las gotas [Olsen y otros, 1978].

Se han calculado los valores de k y α para la distribución del tamaño de las gotas de Laws y Parsons y para una temperatura de las gotas de 20°C suponiendo gotas esferoidales aplastadas en los polos alineadas en un eje de rotación vertical y cuyas dimensiones guardan relación con gotas esféricas de igual volumen [Fedi, 1979; Maggiori, 1981]. En el cuadro 1 de la Recomendación UIT-R P.838 se hallan los valores de las polarizaciones horizontal y vertical.

Los valores de k y α en frecuencias distintas a las dadas en el cuadro pueden obtenerse por interpolación logarítmica de f y k , y por interpolación lineal de α . En lo que respecta a la polarización lineal y circular, la Recomendación UIT-R P.838 proporciona expresiones aproximadas para calcular k y α a partir de los valores de las polarizaciones horizontal y vertical.

Otras mediciones [Manabe y otros, 1987; Zakharyan y otros, 1989] permiten pensar que, por encima de unos 40 GHz, los valores de k del cuadro 1 de la Recomendación UIT-R P.838 pueden estar subestimados y que los valores de α están sobrestimados. Ese resultado puede indicar que la distribución del tamaño de las gotas de Laws y Parsons no es apropiada en frecuencias superiores a unos 40 GHz.

En el Manual de Radiometeorología se examina con más detalle la relación entre atenuación específica e intensidad de la lluvia.

3.2.2 Dependencia a largo plazo con la frecuencia y la polarización de las estadísticas de atenuación por la lluvia

Puede utilizarse el método del punto 2.2.1 de la Recomendación UIT-R P.618 para investigar la dependencia de las estadísticas de atenuación respecto al ángulo de elevación, la polarización y la frecuencia, por lo cual constituye un instrumento general útil para determinar por extrapolación la atenuación conforme a esos parámetros.

Si sólo se dispone de datos de la atenuación medidos en una frecuencia, la fórmula empírica (14) de la Recomendación UIT-R P.618, que da directamente una relación de atenuación en función de la frecuencia y de la atenuación, puede aplicarse para establecer la dependencia con las frecuencias en el mismo trayecto en la gama de frecuencias comprendida entre 7 y 50 GHz. Se ha observado que la fórmula representa el mejor ajuste estadístico respecto a los datos de extrapolación disponibles [Boithias, 1989]. Como la exactitud de este procedimiento está dentro del 10%, es preferible utilizar la dependencia con las frecuencias, si es aplicable, a las predicciones que emplean los datos de intensidad de lluvia.

La dependencia con las frecuencias se examina con mayor detalle en el Manual de Radiometeorología del UIT-R, que da otro método en el que se utilizan los valores de k y α y que, por consiguiente, es más apropiado cuando se requiere establecer la relación con la polarización. Algunos otros métodos utilizan las estadísticas de atenuación medidas en dos frecuencias o los datos sobre el ángulo de elevación para predecir la atenuación en otra frecuencia.

3.2.3 Variaciones estacionales - mes más desfavorable

La planificación de sistemas exige a menudo conocer la atenuación rebasada durante un porcentaje de tiempo P_w del "mes más desfavorable" (véase la Recomendación UIT-R P.581). La conversión de las estadísticas anuales a las estadísticas del "mes más desfavorable" se examina en detalle en el Manual de Radiometeorología del UIT-R. La relación entre P_w y el porcentaje anual de tiempo, P puede expresarse del siguiente modo:

$$P = Q_1^{\frac{-1}{1-\beta}} P_W^{\frac{1}{1-\beta}} \quad (3.2)$$

La anterior ecuación es aplicable para la gama de porcentajes de tiempo ($0,001\% < P < 3\%$). En el Manual de Radiometeorología del UIT-R aparecen los valores de Q_1 y β medidos en distintos emplazamientos y para varios efectos de la propagación. Con objeto de realizar una planificación a escala mundial puede ser preferible utilizar una sola relación "media", utilizando $Q_1 = 2,85$ y $\beta = 0,13$, lo que da:

$$P = 0,3 P_W^{1,15} \quad (3.3)$$

para $1,9 \times 10^{-4} < P_W \% < 7,8$.

Las mediciones obtenidas en distintos climas muestran que la relación entre el porcentaje de tiempo anual del mes más desfavorable y el porcentaje de tiempo anual medio depende en cierto modo del clima. La anterior ecuación corresponde a climas con variaciones estacionales de la intensidad de la lluvia relativamente pequeñas. En el cuadro 1 de la Recomendación UIT-R P.841 se dan valores de β y Q_1 para distintas regiones del mundo.

3.2.4 Examen de la evaluación del modelo (pruebas)

En la Recomendación UIT-R P.311 se facilitan criterios de prueba para comparar los métodos de predicción, incluida la definición de una variable de prueba para comparar las predicciones de la atenuación por la lluvia. Las amplias pruebas efectuadas basándose en los datos y métodos disponibles permiten pensar que el método del punto 2.2.1 de la Recomendación UIT-R P.618 sirve para obtener un valor eficaz de la exactitud del 35% - 40% aproximadamente sobre una base mundial. Se necesitan datos estadísticos a largo plazo adicionales, procedentes en particular de las regiones tropicales, para mejorar el método de predicción.

3.2.5 Ejemplo de cálculo

Para un enlace por satélite desde un emplazamiento determinado, se necesitan los siguientes parámetros:

Emplazamiento: (Río de Janeiro)

Latitud: $22^\circ 54' 10''$ S

Longitud: $43^\circ 12' 28''$ W

$h_s = 30$ m (altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar)

Satélite: (ficticio)

Longitud: 53° W

Frecuencia: 12 GHz

Polarización: vertical

Ángulo de elevación del trayecto, $\theta = 60,905^\circ$

Datos sobre la lluvia: $R_{0,01} = 70,4$ mm/hr (intensidad de lluvia en un punto durante el 0,01% del tiempo de un año medio)

Este valor es el índice de pluviosidad rebasado durante el 0,01% de un año, obtenido a partir de mediciones efectuadas en el propio emplazamiento, como la media de los valores en cada año de medición. En emplazamientos donde no se disponga de este valor, puede determinarse mediante el cuadro 1 de la Recomendación UIT-R P.837. La zona hidrometeorológica que debe seleccionarse en el cuadro se obtiene a partir de las figuras 1 a 3 de la propia Recomendación.

Cuando se dispone de los parámetros necesarios, la aplicación del método de predicción de la atenuación paso a paso que figura en el punto 2.2.1.1 de la Recomendación UIT-R P.618 es bastante directa, como puede verse a continuación:

Paso 1: Cálculo de la altura efectiva de la lluvia, h_R , para la latitud de la estación φ :

$$h_R \text{ (km)} = 3,0 + 0,028\varphi = 3,64 \text{ km}$$

Paso 2: La longitud del trayecto oblicuo, L_S es:

$$L_S = \frac{(h_R - h_s)}{\text{sen}\theta} = 4,13 \text{ km}$$

Paso 3: La proyección horizontal, L_G es:

$$L_G = L_S \cos\theta = 2,0 \text{ km}$$

Paso 4: La intensidad de lluvia, $R_{0,01}$, rebasada durante el 0,01% de un año medio es 70,4 mm/hr

Paso 5: L_0 es:

$$35 \exp(-0,015R_{0,01}) = 12,17$$

El factor de reducción $r_{0,01}$ para el 0,01% del tiempo se calcula según la fórmula:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + \frac{L_G}{L_0}} = 0,858$$

Paso 6: La atenuación específica, γ_R , utilizando los coeficientes dependientes de la frecuencia que aparecen en la Recomendación UIT-R P.838 y el índice de intensidad de lluvia, $R_{0,01}$, es:

$$\gamma_R = k(R_{0,01})^\alpha = 2,769$$

Paso 7: La atenuación prevista rebasada durante el 0,01% de un año medio es:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_S r_{0,01} = 9,8 \text{ dB}$$

Paso 8: La atenuación estimada que va a rebasarse durante otros porcentajes de un año medio, del 0,001% al 1% es:

$$A_p = A_{0,01} \cdot 0,12 \cdot p^{-(0,546+0,043 \log(p))}$$

La distribución acumulativa se representa en la figura 3.2.

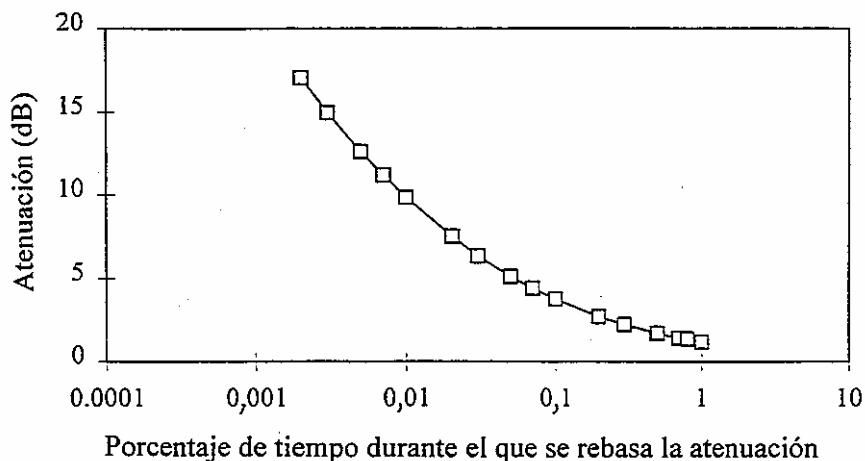


FIGURA 3.2

Ejemplo de valores estadísticos de la atenuación debida a la lluvia

3.2.6 Atenuación por las nubes

La formación de nubes puede deberse a distintos procesos atmosféricos, que provocan capas de nubes a diversas altitudes. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) especifica nueve tipos distintos de nubes para cada una de tres alturas de las nubes: baja, media y alta. Basándose en observaciones que utilizan esa clasificación de la OMM se han preparado mapas de la cobertura nubosa [Warren y otros, 1986] que muestran que sobre la tierra existen nubes, de un tipo u otro durante un promedio del 53% del tiempo. Por consiguiente, cualquier enlace satélite-Tierra que necesite mantener comunicaciones durante una amplia fracción del tiempo, tendrá que diseñarse para funcionar a través de las nubes.

La atenuación debida a las nubes en los enlaces de microondas Tierra-espacio no constituye habitualmente un factor significativo para los servicios de alta disponibilidad (99,96% de tiempo de funcionamiento del enlace en un año medio; 0,2% de tiempo de interrupción en el mes más desfavorable medio para una conexión unidireccional). El margen adicional requerido para las nubes además del necesario para contrarrestar la atenuación por la lluvia es relativamente pequeño. Por el contrario, si se emplea un sistema de margen de desvanecimiento bajo, la atenuación debida a las nubes puede ser importante en frecuencias superiores a unos 10 GHz.

Por ejemplo, las grandes nubes cúmulos pueden producir más de 2 dB de atenuación en trayectos con ángulos de elevación inferiores a 5° en frecuencias de alrededor de 11 GHz. Los mapas de las nubes [Warren y otros, 1986] muestran que existen cúmulos en el 5% como promedio del tiempo sobre la tierra, lo que constituye una fracción significativa del tiempo para cualquier requisito de servicio. A medida que las nubes están más cargadas con agua, aumenta la probabilidad de la precipitación, así como el riesgo de encontrar una atenuación significativa en el trayecto del enlace. Es más probable que, para ángulos de elevación muy bajos, el centelleo troposférico tenga mayor importancia que las pérdidas causadas por las nubes.

En la Recomendación UIT-R P.840 aparece un método de predicción para la atenuación debida a las nubes y a la niebla que puede ser interesante para frecuencias superiores a unos 100 GHz. Dicho modelo se basa en el mecanismo físico de la dispersión de Rayleigh por las gotas de lluvia y exige conocer el contenido de agua líquida en la nube.

3.3 Diversidad y características espaciales de la lluvia

Los tipos locales de clima son afectados significativamente por el terreno sobre el que se producen. Las fluctuaciones en pequeña escala de esos tipos de clima pueden dar lugar a que se produzcan diferencias notables de pluviosidad de un lugar a otro. Las diferencias de pequeña escala en los tipos de lluvia pueden reflejarse en las correspondientes diferencias de atenuación en el trayecto con respecto al emplazamiento (esto es, de lugar a lugar) o a la dirección de observación (esto es, de acimut a acimut en el mismo emplazamiento).

No es excepcional que existan zonas de sombreado por la lluvia o de producción elevada de lluvia que estén geográficamente cercanas (< 30 km). Se obtuvo un ejemplo al respecto en la campaña experimental ATS-6, realizada en Europa, mientras el satélite se hallaba estacionado en una longitud de 35°E [Allnutt y Shutie, 1997]. Las diferencias constantes en las estadísticas acumulativas de intensidad de la lluvia de un lugar a otro, en una zona pequeña, pueden utilizarse ventajosamente para seleccionar un emplazamiento preferido de la estación terrena. Suele escogerse habitualmente el emplazamiento con las estadísticas más bajas de intensidad de la lluvia.

Sin embargo, si el enlace al satélite debe pasar por una región de elevada producción de lluvia, puede perderse una parte de la ventaja de la selección de un emplazamiento óptimo. Esa situación se observó en un experimento en el curso de las campañas SIRIO y OTS [Rucker, 1980]. Una sierra montañosa de unos 200 m de altura, aproximadamente paralela al ángulo de acimut respecto al satélite SIRIO, causó una pluviosidad apreciablemente más intensa a lo largo de ese trayecto que en el trayecto hacia el satélite OTS, que se hallaba fundamentalmente sobre el suelo de un valle.

No obstante, tienen más importancia para los servicios de alta disponibilidad, las diferencias temporales de la intensidad de la lluvia en distancias pequeñas. Este aspecto puede utilizarse ventajosamente para reducir la atenuación neta experimentada en un trayecto oblicuo si se utiliza simultáneamente más de un emplazamiento. La técnica se denomina diversidad de emplazamiento o diversidad de trayecto [Hogg, 1967].

3.3.1 Diversidad de emplazamiento

En los sistemas de telecomunicaciones, la diversidad de emplazamiento implica la existencia de distintos trayectos de propagación para la transmisión de la señal, con la capacidad de seleccionar el trayecto menos degradado cuando las condiciones lo exigen. Para los sistemas de comunicación por satélite, la realización de la diversidad de trayecto exige el despliegue de dos o más estaciones terrenas terminales interconectadas en emplazamientos espacialmente separados, de ahí el término "diversidad de emplazamiento". En la figura 3.3 aparece una representación gráfica.

Las mediciones [Wilson y Mammel, 1973; Witternigg y otros, 1993] y el análisis [Hodge, 1974] indican que la disponibilidad adicional obtenida por el funcionamiento simultáneo con más de dos terminales es reducida. El empleo de terminales adicionales de diversidad para funcionar con una estación principal sería también complejo y costoso. Sin embargo, recientemente se ha mostrado interés por el logro de una disponibilidad relativamente alta (> 99,9%) para terminales de abertura muy pequeña ("Very Small Aperture Terminals": VSAT) en las bandas de 14/11 GHz o 30/20 GHz, utilizando cierto número de VSAT interconectados por medio de una red de zona metropolitana ("Metropolitan Area Network": MAN), así como un controlador de red de diversidad de zona extensa ("Wide Area Diversity": WAD) [Allnutt, 1993]. Cada VSAT actuaría como un recurso transparente para cualquier usuario conectado a la MAN y sería activado por el controlador WAD cuando lo exigieran la situación meteorológica y/o del tráfico. Está prevista la realización de experimentos para determinar la viabilidad de las técnicas de WAD con VSAT en MAN en 14/11 GHz y 30/20 GHz.

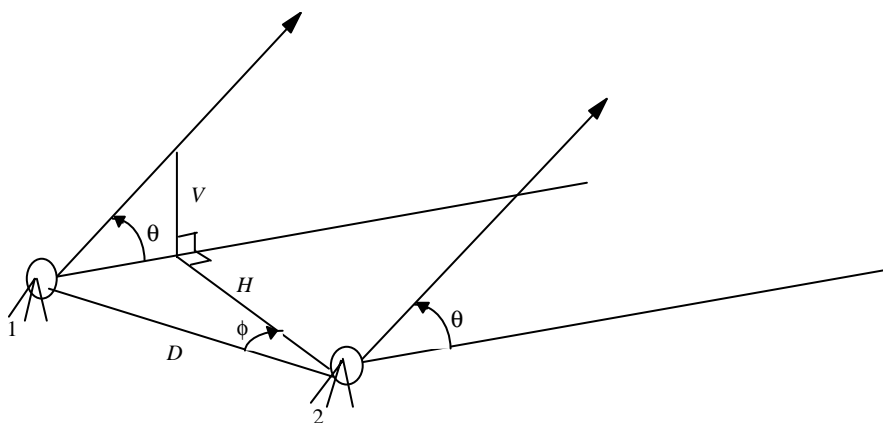


FIGURA 3.3

Configuración de diversidad de doble emplazamiento

H y V son las separaciones de trayecto horizontal y vertical, respectivamente

Sin embargo, desde el punto de vista meteorológico puede obtenerse escasa información adicional por la realización de experimentos de diversidad de localización múltiple (tres o más terminales), si las características orográficas no permiten pensar en esa configuración. Por ello, las investigaciones han concedido mayor importancia a las configuraciones de diversidad de doble emplazamiento para las comunicaciones por satélite.

Existen varios factores que pueden afectar a la calidad de funcionamiento de una instalación dada de diversidad de doble emplazamiento. A saber:

- a) separación de los terminales, d ;
- b) geometría del trayecto (ángulo de elevación θ y ángulo de acimut ϕ);
- c) características meteorológicas locales (estadísticas de intensidad de lluvia, grado de convectividad, dimensiones y formas de las células de lluvia, separación relativa de las células, etc.);
- d) frecuencia, f ;
- e) orientación de la línea de base que une las localizaciones; y
- f) características topográficas locales.

Existen interrelaciones entre esos parámetros, indicadas gráficamente en la figura 3.4, de modo que es difícil aislar la dependencia de cualquiera de ellos en el comportamiento de la diversidad. Se trata de esos aspectos en el punto 3.3.1.7.

La presentación estadística de las estadísticas conjuntas de atenuación en el trayecto y el cálculo de la calidad de funcionamiento en la diversidad dependen en cierto modo de la distribución de referencia seleccionada.

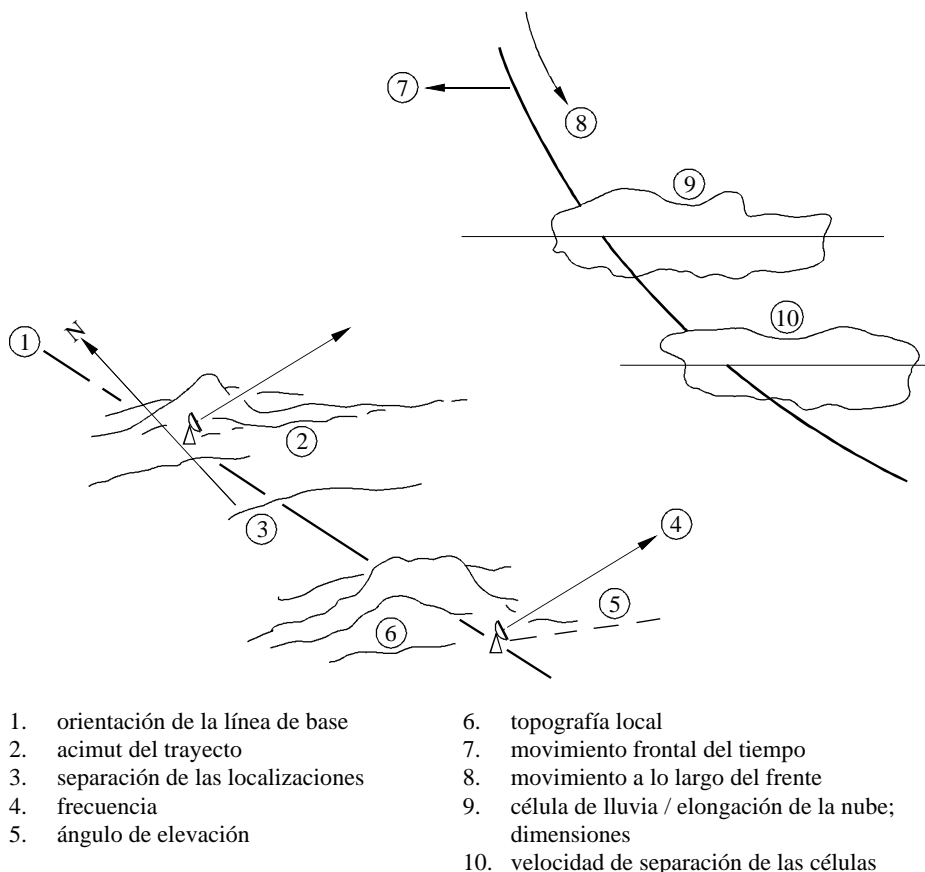


FIGURA 3.4

Factores que influyen en la calidad de funcionamiento de la diversidad de emplazamiento

3.3.1.1 Distribución de referencia

Si siempre puede identificarse y seleccionarse con éxito para las comunicaciones el trayecto menos degradado de una configuración de diversidad, la distribución acumulativa definida en cada porcentaje de tiempo por el valor menor de A y B en la figura 3.5, constituirá idealmente una distribución de referencia más razonable que la distribución media en la localización única. La calidad de funcionamiento en la diversidad será entonces difícilmente calculable con la atenuación media en el trayecto único, lo que plantea una aparente paradoja: ¿por qué la conmutación perfecta entre los trayectos de diversidad no aumenta al máximo la calidad de funcionamiento disponible en la diversidad?

De hecho, esa conmutación aumenta al máximo la calidad de funcionamiento en la diversidad, pero los resultados se reflejan en la distribución (conjunta) de la diversidad de la figura 3.5. El supuesto de la conmutación perfecta está implícito en los datos disponibles, que son tratados seleccionando la menor atenuación en el trayecto para cada intervalo de muestra a fin de compilar la distribución conjunta de la atenuación. La combinación de la diversidad logrará también la meta de la "conmutación perfecta" ya que siempre se utilizará como referencia la más fuerte de las dos señales. En las señales analógicas se requiere un control de fases muy preciso para alcanzar la combinación de la diversidad, por lo cual tiende a limitarse a aplicaciones de banda bastante estrecha.

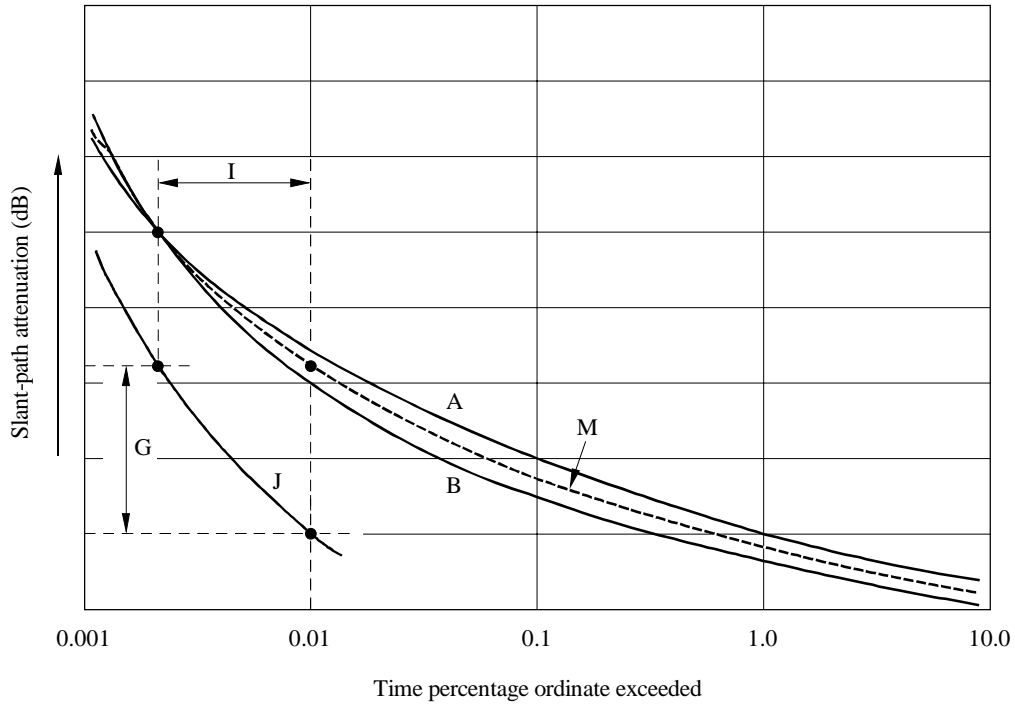


FIGURA 3.5

Ilustración de los parámetros de la diversidad

En los sistemas en funcionamiento se alcanzará la conmutación siguiendo un algoritmo destinado a reducir al mínimo el número de conmutaciones y la probabilidad consiguiente de una interrupción temporal del enlace, manteniendo a la vez un servicio aceptable [Wallace y Carr, 1982]. Así, se evitará habitualmente la conmutación, incluso si está degradado el enlace primario, siempre que esté disponible el trayecto con algún margen de reserva razonable. En cualquier caso, las imprecisiones de la medición en el equipo de monitorización introducirán inevitablemente errores al establecer el trayecto menos degradado y, por consiguiente, la eficacia de la conmutación. En tales circunstancias, no se logrará la distribución conjunta de la atenuación alcanzable con una conmutación perfecta. El grado con el que se alcanzará depende de la estrategia de la conmutación y de la exactitud de medición del equipo.

Las anteriores consideraciones hacen que los detalles de la distribución de referencia sean bastante discutibles para numerosas aplicaciones. En la práctica, la atenuación media en una localización única es una referencia conveniente que, según es de suponer, establece un promedio de algunas de las imprecisiones experimentales y las variaciones interanuales de las estadísticas medidas para distintos trayectos.

Existen dos enfoques estadísticos normalizados para establecer una relación entre las distribuciones medias de la atenuación en la diversidad y en el emplazamiento único, como se ilustra en la figura 3.5: Factor de mejora por diversidad y ganancia por diversidad.

3.3.1.2 Factor de mejora por diversidad

En la figura 3.5 se presenta un ejemplo hipotético, pero representativo, de las distribuciones acumulativas de la atenuación por la lluvia en 11 GHz en el caso de dos trayectos únicos (A y B) y de la distribución (conjunta) de la diversidad (J) establecida a partir de registros simultáneos del desvanecimiento para los trayectos A y B , seleccionando la menor atenuación para cada muestra de datos.

La media (promedio) de los dos valores de atenuación por la lluvia en cada porcentaje de tiempo define la distribución media de la atenuación en una localización única (línea discontinua en la figura 3.5), que se utiliza corrientemente como distribución de referencia para clasificar la calidad de funcionamiento de la diversidad.

El factor de mejora de la diversidad [Wilson y Mammel, 1973] (o ventaja de la diversidad [Hodge, 1974]), I , se define como la relación entre los porcentajes de tiempo en el trayecto único p_m y por diversidad p_{div} para una determinada atenuación por la lluvia A :

$$I(A) = \frac{p_m(A)}{p_{div}(A)} \quad (3.4)$$

En el punto 2.2.4.1 de la Recomendación UIT-R P.618 se describe un modelo para el factor de mejora por diversidad I .

3.3.1.3 Ganancia por diversidad

La ganancia por diversidad, G , se define [Altman y Sichak, 1956; Hodge, 1973] en un sentido ortogonal respecto a la ventaja por diversidad, y es la diferencia (en dB) entre las atenuaciones por la lluvia en trayecto único y por diversidad para un determinado porcentaje de tiempo, p (véase la figura 3.5):

$$G(p) = A_m(p) - A_{div}(p) \quad (3.5)$$

La ganancia por diversidad puede calcularse para una determinada configuración por diversidad de emplazamiento doble aplicando el modelo dado en el punto 2.2.4.2 de la Recomendación UIT-R P.618.

3.3.1.4 Ganancia instantánea por diversidad

Para caracterizar la ganancia en la diversidad se ha propuesto una magnitud adicional denominada "ganancia instantánea por diversidad" [Towner y otros, 1984]. Para una configuración con diversidad en N localizaciones, la ganancia instantánea por diversidad en el instante t se define como:

$$G_i(t) = A_{m\acute{a}x}(t) - A_{m\acute{i}n}(t) \quad (3.6)$$

donde $A_{m\acute{a}x}(t)$ y $A_{m\acute{i}n}(t)$ son los valores máximo y mínimo de las N atenuaciones en trayecto único en el instante t . Para una configuración en la diversidad de doble localización, $G_i(t)$ es simplemente la diferencia positiva entre las dos atenuaciones en el trayecto en cualquier momento.

La ganancia por diversidad no proporciona información instantánea, pero facilita los datos estadísticos básicos necesarios para diseñar un sistema de diversidad. Al tratar los datos sobre la base de la ganancia instantánea en la diversidad se pierden los datos básicos requeridos para el diseño del sistema, que son la disponibilidad adicional (estadística) o el margen de desvanecimiento proporcionado por la diversidad, y no la diferencia instantánea entre las atenuaciones.

3.3.1.5 Comparación entre el factor de mejora por diversidad y la ganancia por diversidad como parámetros de medición

Una ventaja del factor de mejora por diversidad es que puede determinarse para los pequeños porcentajes de tiempo de la distribución por diversidad. Por el contrario, no puede evaluarse en el caso de grandes atenuaciones en una localización única. Para la ganancia por diversidad, las regiones de aplicabilidad están justamente invertidas.

La ganancia y la mejora por diversidad se definen ambas con las mismas distribuciones acumulativas y son en cierto sentido equivalentes. Sin embargo, como se ha observado [Hodge, 1974], las atenuaciones en trayecto único y en diversidad utilizadas para calcular la mejora por diversidad corresponden a distintos porcentajes de tiempo y, por consiguiente, tienen distintas fiabilidades estadísticas. En particular, las atenuaciones para los pequeños porcentajes de tiempo de la distribución por diversidad pueden estar sometidas a amplias incertidumbres estadísticas, que se reflejarán en el factor de mejora. Los factores de mejora por diversidad determinados experimentalmente [Allnutt, 1978; Lin y otros, 1980], revelan de hecho un comportamiento bastante irregular y disperso, mientras que la ganancia por diversidad presenta típicamente características más o menos predecibles [Allnutt, 1978; Hodge, 1976]. Así pues, la ganancia por diversidad parece ser el parámetro de elección para especificar la calidad de funcionamiento en condiciones de diversidad.

3.3.1.6 Ejemplo de cálculos utilizando los procedimientos recomendados de predicción con diversidad de emplazamiento

3.3.1.6.1 Factor de mejora por diversidad

En la Recomendación UIT-R P.618, el factor de mejora por la diversidad, I , aparece dado por la ecuación (16), en donde p_1 y p_2 son los porcentajes de tiempo respectivos en el emplazamiento único y en condiciones de diversidad, y β es un parámetro que depende de las características del enlace. La aproximación

$$I \approx \left[1 + \frac{100\beta^2}{p_1} \right] \quad (3.7)$$

procedente de la ecuación (16) de la Recomendación UIT-R P.618 es aceptable en casi todos los casos porque normalmente β tiene un valor reducido.

La realización de un amplio número de mediciones en la banda de 10-20 GHz, y principalmente entre 11 y 13,6 GHz, ha permitido observar que el valor de β^2 depende fundamentalmente de la distancia entre las estaciones terrenas, d (km), y sólo ligeramente del ángulo de elevación y la frecuencia. Se ha observado que β^2 puede expresarse por la relación empírica de la ecuación (17) de la Recomendación UIT-R P.618.

Ciertos datos permiten pensar que esa ecuación puede modificarse para tener en cuenta la influencia de los variados ángulos de elevación utilizando la siguiente expresión:

$$\beta^2 = 10^{-4} (\text{sen}\theta)^{0,5} d^{1,5} \quad (3.8)$$

pero todavía no se ha verificado plenamente esta relación.

En la figura 3.6 se representa p_2 en función de p_1 basándose en las ecuaciones (16) y (17) de la Recomendación UIT-R P.618.

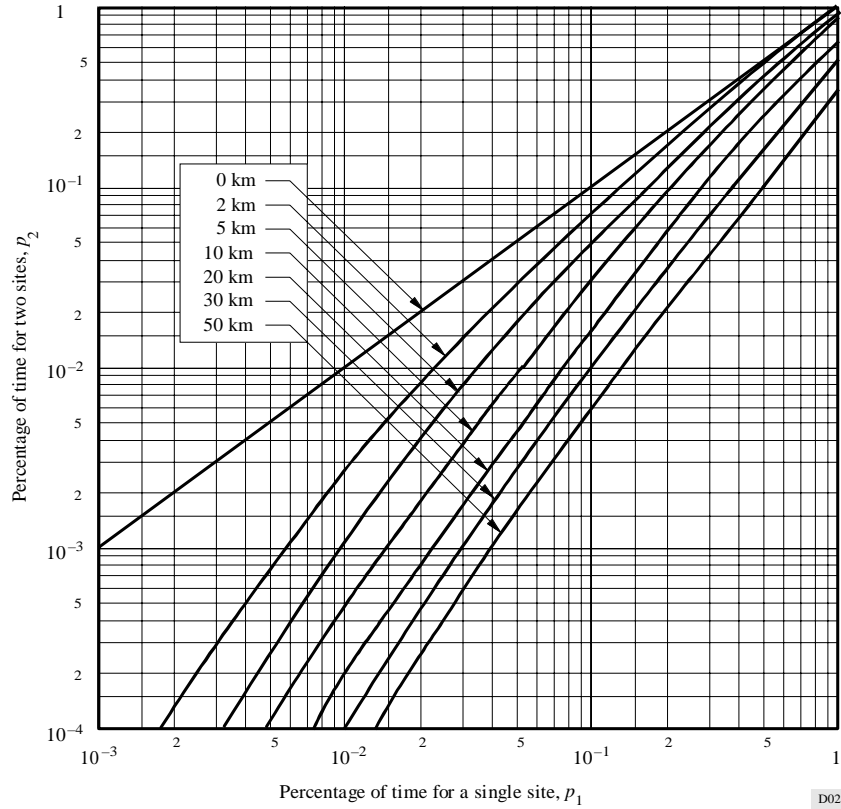


FIGURA 3.6

Relación entre los porcentajes de tiempo con y sin diversidad de emplazamiento para la misma atenuación

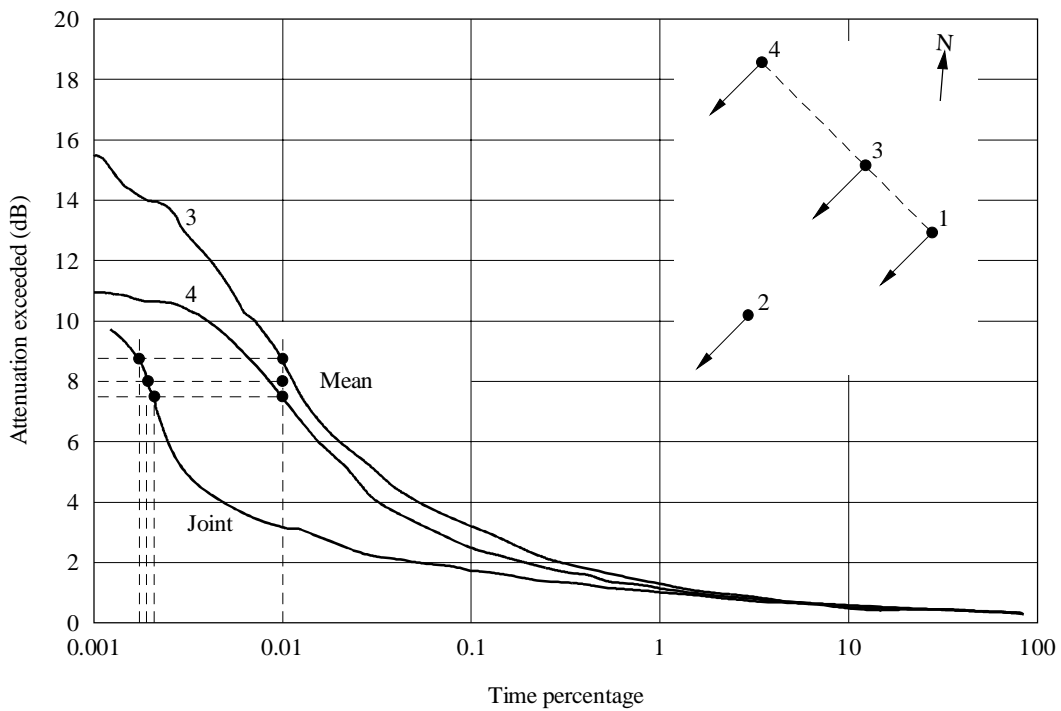


FIGURA 3.7

Algunos resultados obtenidos en dos emplazamientos en un experimento con diversidad de emplazamiento cuádruple a 12 GHz en Graz (Austria) [Witternigg y otros, 1987]

En la figura 3.7 se representan los datos obtenidos utilizando 3 y 4 emplazamientos en un experimento realizado en Graz (Austria) a una frecuencia de 12 GHz [Witternigg y otros, 1987]. La parte gráfica de la figura 3.7 es la disposición de la red de cuatro emplazamientos de radiometría. La separación de esos dos emplazamientos fue de 15,4 km, con un ángulo de elevación de 26,4°, y el ángulo entre el acimut y la orientación de la línea básica fue casi de 90°.

Con una separación de emplazamientos de 15,4 km, $\beta^2 = 0,00386$ según la ecuación (17) de la Recomendación UIT-R P.618. Introduciendo este valor de β^2 en la ecuación (16) para una atenuación media en emplazamiento único de 8 dB, que se produce en un porcentaje de tiempo $p_1 = 0,01\%$, se obtiene:

$$I = 1 + (100 \times 0,00386)/0,01 = 39,6 \quad (3.9)$$

La figura 3.7 permite deducir que la ventaja medida de la diversidad para un porcentaje de tiempo en emplazamiento único del 0,01% es de $0,01/0,002 = 5$. Obsérvese que se ha utilizado la característica media de emplazamiento único en lugar de cualquiera de las distribuciones de emplazamiento único (como se indica más arriba en el punto 3.3.1.1).

En el presente ejemplo, la ventaja calculada de la diversidad es mucho mayor que el valor medido, lo que puede deberse a la limitación de la muestra de datos (los resultados de la figura 3.7 corresponden a un año del experimento). En la figura 3.7, la característica de atenuación conjunta en el trayecto no sigue la misma tendencia en porcentajes de tiempo bajos que las características de los dos emplazamientos únicos. En muchos sentidos, ello destaca la variabilidad del empleo de la ventaja de la diversidad como método para predecir la calidad de funcionamiento de la diversidad de emplazamiento.

3.3.1.6.2 Ganancia por diversidad

La Recomendación UIT-R P.618 proporciona un procedimiento para calcular la ganancia por diversidad, G , entre pares de emplazamientos de la estación terrena utilizando los siguientes parámetros:

- d : separación entre los dos emplazamientos (km)
- A : atenuación en un trayecto debida a la lluvia para un solo emplazamiento (dB)
- f : frecuencia (GHz)
- θ : ángulo de elevación del trayecto (grados)
- ψ : ángulo establecido por el acimut del trayecto de propagación respecto a la línea de base entre los emplazamientos, elegido de modo que $\psi \leq 90^\circ$.

En el procedimiento de predicción dado en la Recomendación UIT-R P.618, la ganancia G_d proporcionada por la separación espacial de los emplazamientos de la estación terrena en una separación d (km) se calcula mediante la ecuación (18); la ganancia G_f debida al término dependiente de la frecuencia viene determinada por la ecuación (19); la ganancia G_θ procedente del elemento del ángulo de elevación viene determinada por la ecuación (20); y la ganancia G_ψ derivada del elemento dependiente de la línea de base se obtiene mediante la ecuación (21). La ganancia global por diversidad, G , se calcula como el producto de los cuatro elementos de la ganancia por diversidad:

$$G = G_d G_f G_\theta G_\psi \quad (\text{dB}) \quad (3.10)$$

Cuando se probó el método anterior utilizando el banco de datos de la CE 3 del UIT-R de diversidad de emplazamiento, se observó que la media aritmética y la desviación típica eran de 0,14 dB y 0,96 dB, respectivamente, con un error cuadrático medio de 0,97 dB. En fecha más reciente [Allnutt, 1993] se ha observado que el anterior procedimiento de predicción de la ganancia por diversidad tiende a sobrestimar ligeramente en los niveles bajos de la atenuación de emplazamiento único (esto es, predice una ganancia mayor que la obtenida en la práctica) y a subestimar ligeramente en los niveles altos de la atenuación en emplazamiento único (esto es, predice una ganancia inferior a la obtenida en la práctica). El método parece alcanzar su mayor exactitud en los niveles de desvanecimiento en emplazamiento único correspondientes al 0,01% de un año medio, que es un porcentaje de tiempo decisivo para sistemas de satélite de alta disponibilidad.

En lo que respecta al cálculo en muestra de la ventaja por diversidad antes dado, la ganancia por diversidad se calculará para el mismo par de emplazamientos y para el mismo conjunto de datos (véase la figura 3.7). Partiendo del procedimiento de la ganancia por diversidad antes reseñado, con $d = 15,4$ km; $f = 12$ GHz; ángulo de elevación $\theta = 26,4^\circ$; y ángulo entre el acimut de la línea de base y el acimut del ángulo de visión $\psi = 90^\circ$, ecuaciones (18)-(21) de la Recomendación UIT-R P.618, respectivamente, se obtiene:

$$a = 5,1047 \text{ y } b = 0,3249, \text{ de aquí}$$
$$G_d = 5,0704, G_f = 0,7483, G_\theta = 1,1584, G_\psi = 1,18$$

Partiendo de la ecuación (22) para la ganancia por diversidad, se calcula una ganancia estimada de $G = 5,2$ dB.

Basándose en la figura 3.7, la ganancia por diversidad medida en un porcentaje de tiempo del 0,01% es de $8 - 3,1 = 4,9$ dB. Como se ha indicado más arriba, la ganancia por diversidad es un parámetro relativamente estable de un año a otro. En este caso, la diferencia entre la ganancia por diversidad medida y prevista es de $\approx 0,3$ dB, con un error del 6% aproximadamente.

3.3.1.7 Factores que influyen en la calidad de funcionamiento con diversidad de emplazamiento

Se han realizado distintas mediciones con diversidad de emplazamiento, que aparecen resumidas en varias referencias bibliográficas (por ejemplo, [Hodge, 1982; Ippolito y otros, 1983; Rogers y Allnutt, 1984]). Muchos de los parámetros que pueden afectar a la instalación de la diversidad de emplazamiento están interrelacionados (por ejemplo, orientación de la línea de base, geometría del trayecto y terreno local) y se considerarán algunas de esas relaciones.

3.3.1.7.1 Dependencia respecto a la separación de los emplazamientos

El concepto de la diversidad de emplazamiento está basado en el supuesto de que las degradaciones de la propagación en distintos trayectos apenas tienen relación si hay suficiente separación espacial entre los trayectos. A la inversa, las degradaciones de la propagación en trayectos idénticos (esto es, trayectos paralelos con separación nula) guardan una correlación completa. Entre esos límites, la separación de los emplazamientos (o trayectos) debe ser un fuerte determinante de la ganancia por diversidad. No es extraño, pues, que las mediciones muestren que la separación de emplazamientos d , es el factor dominante en la calidad de funcionamiento con diversidad para separaciones inferiores a 10 a 20 km [Hogg, 1967; Wilson y Mammel, 1973; Rogers y Allnutt, 1984].

La dependencia de la ganancia por diversidad, G , respecto a la separación de emplazamientos, se ilustra en la figura 3.8 [Hodge, 1976], basándose en datos en tres frecuencias procedentes de Ohio y New Jersey (EE.UU.). Se observa que la ganancia por diversidad crece rápidamente al aumentar d

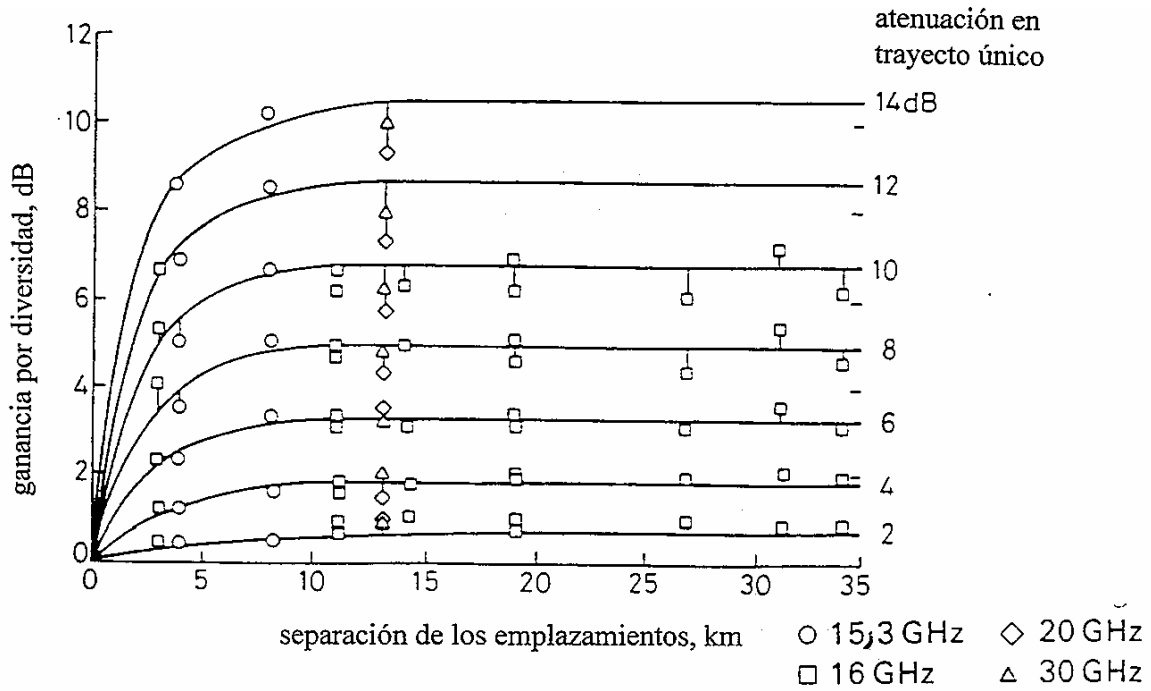


FIGURA 3.8

Ganancia por diversidad en función de la separación de emplazamientos

Propiedad intelectual, 1976 IEEE [Hodge, 1976]

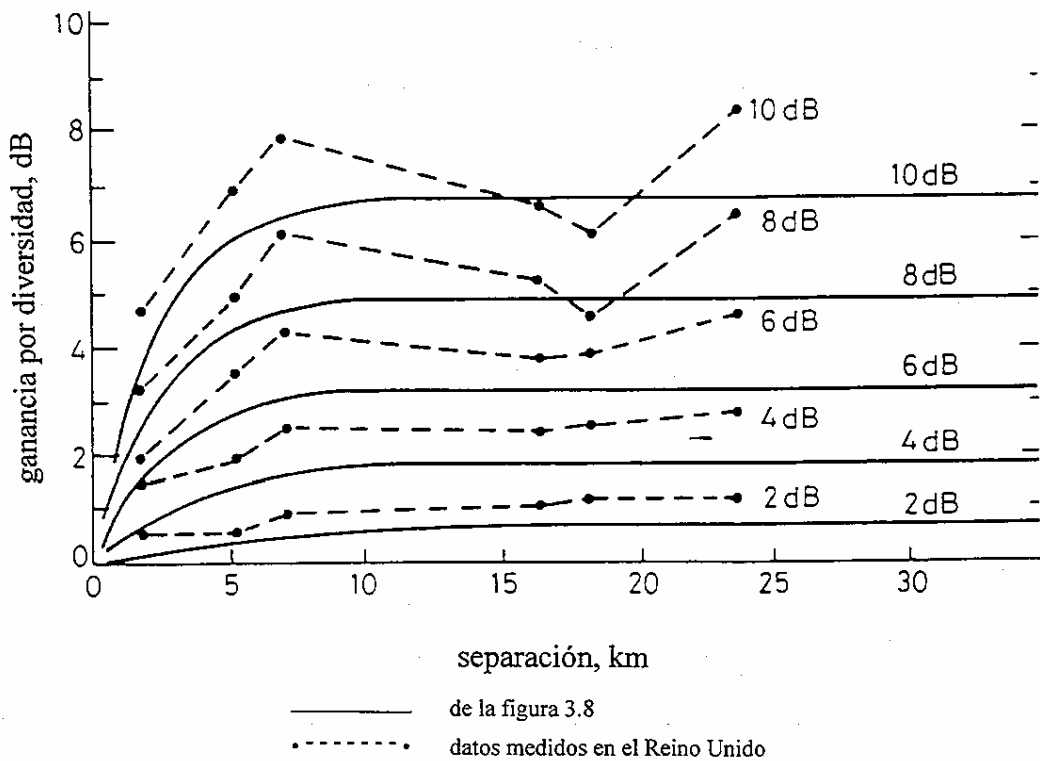


FIGURA 3.9

**Ganancia por diversidad en función de la separación de emplazamientos:
comparación de datos estadounidenses y europeos**

(Reproducido con autorización de INTELSAT y COMSAT)

desde cero hasta que la separación toma un valor de 10 a 15 km, a partir del cual, el incremento de ganancia al aumentar d es pequeño. La separación de emplazamientos en la que se logra el 95% de la ganancia por diversidad disponible varía bastante entre las distintas mediciones, pasando de unos 15 km a unos 30 km [Hodge, 1978]. Esas diferencias pueden deberse a influencias de parámetros distintos de la separación de emplazamientos, como la geometría de la configuración, las diferencias climáticas o los efectos del terreno. Los datos obtenidos en un experimento radiométrico de diversidad de emplazamientos en 11,6 GHz en el Reino Unido [Hall y Allnutt, 1975] muestran tendencias análogas. La figura 3.9 es una comparación de los dos conjuntos de datos, mostrando algunas diferencias interesantes entre los resultados.

Por lo general, la ganancia por diversidad en el experimento del Reino Unido parece rebasar a la obtenida en los experimentos estadounidenses, apoyando el argumento de que, para una separación dada de los emplazamientos, la ganancia por diversidad disminuye al aumentar la frecuencia. Sin embargo, la dependencia es bastante débil, en particular en los ángulos de elevación (25° a 55°) utilizados en estos experimentos.

Asimismo, de conformidad con otros datos europeos [Witternigg y otros, 1993, 1987], el aumento de la ganancia por diversidad al aumentar la separación de los emplazamientos parece ser claramente superior en el experimento del Reino Unido que en los datos observados en los EE.UU. para pequeñas separaciones de emplazamientos. Más significativo es el neto descenso de la ganancia por diversidad en el experimento del Reino Unido para separaciones de emplazamientos comprendidas entre 7 y 18 km, que se produjo porque dos células de lluvia intensas e independientes atravesaron la red de la diversidad de emplazamientos y provocaron desvanecimientos simultáneos por la lluvia en emplazamientos ampliamente separados.

La dependencia observada de la ganancia por diversidad respecto a la separación de emplazamientos es coherente con las características conjuntas de la probabilidad de intensidad de la lluvia en un punto. Ambas magnitudes muestran una descorrelación rápida con el aumento de la separación de emplazamientos, hasta que el efecto de "saturación" comienza a limitar la magnitud hasta un valor correspondiente a algo menos que la descorrelación total [Rogers, 1976; Barbaliscia y Paraboni, 1982]. Las estadísticas simultáneas de atenuación en el trayecto y de intensidad de la lluvia en un punto para emplazamientos diversos muestran con frecuencia un comportamiento comparable, permitiendo pensar que pueden utilizarse las estadísticas de intensidad de la lluvia en un punto para predecir la calidad de funcionamiento de la diversidad de emplazamientos, en forma análoga a las técnicas de predicción utilizadas para convertir estadísticas de intensidad de la lluvia en un punto en estadísticas de atenuación en un trayecto único [Allnutt, 1978].

Teniendo en cuenta que el nivel medio de la lluvia está limitado en dirección vertical y que el tipo de precipitación en el plano horizontal adopta con frecuencia la forma de bandas, es posible que la separación (tanto vertical como horizontal) de los trayectos radioeléctricos pueda ser más importante que la separación física de los emplazamientos [Rogers y Allnutt, 1984]. En la figura 3.4 se ilustra la geometría de la separación perpendicular de los trayectos, que demuestra también la interdependencia de las separaciones de los trayectos respecto a la orientación de la línea de base, el acimut del trayecto y el ángulo de elevación del trayecto.

Para una configuración dada, el terreno local y los factores climáticos (por ejemplo, alineación entre la geometría de configuración y direcciones de los frentes meteorológicos locales, o cualquier anisotropía regional de las estructuras de la lluvia) pueden también relacionarse con la separación de los trayectos. Esos efectos todavía no se conocen plenamente. Sin embargo, las consideraciones meteorológicas han permitido llegar a la conclusión [Rogers, 1976] de que los aumentos horizontales en la separación de los trayectos son más útiles que los aumentos verticales equivalentes al reducir la

probabilidad de degradaciones simultáneas del trayecto, por lo menos en latitudes inferiores a 60 grados y en ángulos de elevación superiores a 3 grados. Para ángulos de elevación inferiores a unos 3°, el centelleo troposférico es tan intenso que pueden necesitarse esquemas de la diversidad en altura para aumentar la calidad de funcionamiento y los márgenes de disponibilidad del enlace [Acampora, 1981; Allnut, 1993].

3.3.1.7.2 Efectos de la orientación de la línea de base

Como se ha señalado antes, las consideraciones meteorológicas [Rogers, 1976] implican que al aumentar al máximo la separación horizontal de los trayectos (para una separación especificada) de las localizaciones, se incrementará también al máximo la ganancia por diversidad. Según la figura 3.4, la máxima separación de los trayectos horizontales se logra orientando la línea de base de la diversidad en sentido perpendicular al acimut del trayecto. Apoyan ese punto de vista los datos procedentes del experimento radiométrico en tres emplazamientos de 15,5 GHz realizado en Nueva Jersey [Gray, 1973] y en una red de radiómetros en seis emplazamientos de 11,6 GHz cerca de Slough, Reino Unido [Hall y Allnut, 1975]. Otra investigación ulterior [Allnut, 1978] llegó también a la conclusión de que la orientación preferida de la línea de base es la normal al trayecto radioeléctrico. Sin embargo, se ha supuesto [Hogg y Chu, 1975] que orientando la línea de base en sentido normal al trayecto radioeléctrico y, secundariamente, en el sentido del desplazamiento de los frentes meteorológicos convectivos, se obtendrían las mayores ventajas de las aplicaciones de diversidad. Esa idea está apoyada por amplias mediciones efectuadas en EE.UU. [Lin y otros, 1980].

Las simulaciones de radar de configuraciones de diversidad en la Isla Wallops, Virginia (EE.UU.), con líneas de base paralelas a los acimuts del trayecto oblicuo, mostraron que era preferible utilizar líneas de base orientadas en sentido perpendicular a la dirección predominante de elongación de la célula de lluvia [Goldhirsh, 1976]. Las mediciones ulteriores efectuadas en el experimento de diversidad de seis emplazamientos, antes mencionado, mostraron también que la dirección prevalente del movimiento de los sistemas meteorológicos puede influir en la calidad de funcionamiento de la diversidad [MacKenzie y Allnut, 1977]. Sin embargo, otras simulaciones de radar [Hodge, 1978; Furgusson y Rogers, 1978] y análisis [Mass, 1979] mostraron sólo una pequeña dependencia de la calidad de funcionamiento de la diversidad respecto a la orientación de la línea de base.

Así pues, los resultados no son concluyentes en lo que respecta a la orientación de la línea de base, lo que indica probablemente que esa orientación no es el parámetro dominante en numerosas configuraciones de la diversidad, y que los factores que pueden influir en la calidad de funcionamiento de la diversidad están suficientemente interrelacionados para que sea difícil atribuir la calidad de funcionamiento observada a un solo parámetro (distinto de la separación de emplazamientos o trayectos). Por ejemplo, en un experimento efectuado en Ontario meridional (Canadá) se atribuyó constantemente la mala calidad de funcionamiento a la intensidad de lluvia orográfica producida por una escarpadura paralela a la línea de base [Strickland, 1977]. Posiblemente ese efecto topográfico podía haber sido anulado reorientando la línea de base en sentido perpendicular a la escarpadura.

Teniendo en cuenta que la probabilidad de degradaciones simultáneas del trayecto debe ser inevitablemente mayor en los casos de líneas de base y acimuts de trayecto paralelos en ángulos de elevación bajos (porque las separaciones verticales de los trayectos serán pequeñas), en particular para separaciones reducidas de emplazamientos, en tales casos será importante la orientación de la línea de base. Dado que la posibilidad de degradación conjunta producida por una sola célula es alta en tal configuración, la orientación preferida de la línea de base será probablemente la bisectriz del ángulo obtuso que forman el acimut del trayecto y el eje mayor de la anisotropía de la célula (aunque en general la última información será desconocida, y puede así ser ignorada). Sin embargo, en el

caso de amplias separaciones de los emplazamientos, las variaciones de la probabilidad conjunta son pequeñas para las distintas orientaciones de la línea de base, como lo confirman los datos medidos.

3.3.1.7.3 Efectos de la geometría del trayecto

La geometría de un trayecto radioeléctrico se define por el acimut del trayecto, ψ , y la elevación del trayecto, θ . En la mayoría de los casos, la dependencia respecto al ángulo del acimut queda incluida en los efectos de orientación de la línea de base, porque el ángulo relativo entre el trayecto y la línea de base parece tener importancia para determinar la ganancia por diversidad. Se ha observado que los efectos del acimut son significativos en algunos casos de funcionamiento en un solo emplazamiento [Rucker, 1980], aunque los efectos observados tal vez no sean tan notables en un experimento de diversidad en dos emplazamientos.

Se observan con frecuencia fuertes efectos del ángulo de elevación sobre la degradación de la propagación en un solo trayecto. A medida que disminuye el ángulo de elevación, aumenta la longitud del trayecto oblicuo a través de la troposfera, con lo cual se incrementa el número de apariciones y la intensidad de las degradaciones en un trayecto único. También se ha previsto, y comprobado en mediciones de la diversidad, un aumento concomitante de la probabilidad de degradaciones conjuntas. Se observó que la ganancia por diversidad a 11,6 GHz para un ángulo de elevación de 6° era aproximadamente la mitad de la lograda a 30° para una separación de emplazamientos de 7,1 km cerca de Slough, Reino Unido [Allnutt, 1977]. Se observó un comportamiento análogo de la ganancia por diversidad en trayectos en 11 GHz en el Japón occidental con un ángulo de elevación de 6° y una separación de trayectos de 17 km [Rogers, 1981] y en Virginia (EE.UU.), a 11° y una separación de 7,3 km [Towner y otros, 1982]. En la figura 3.10 aparecen esas curvas de ganancia por diversidad.

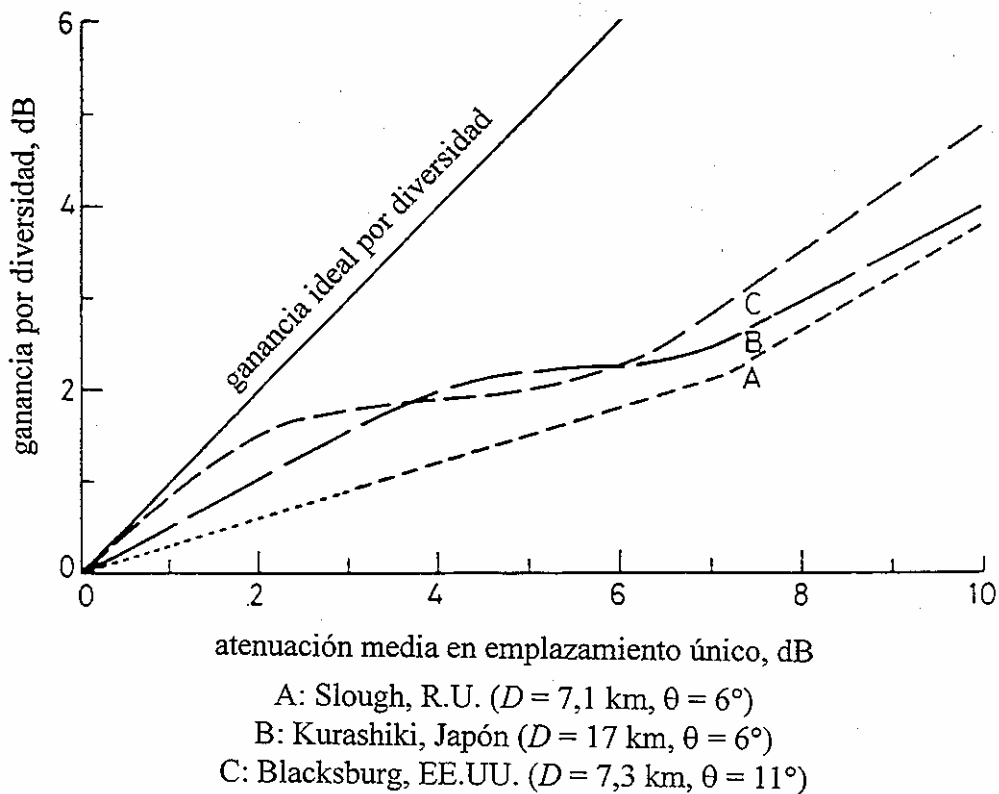


FIGURA 3.10

Comportamiento de la ganancia por diversidad en ángulos de elevación bajos

(Reproducido con autorización de INTELSAT y COMSAT)

Las curvas de la ganancia por diversidad son relativamente planas para las atenuaciones medias en el trayecto de un solo emplazamiento en la gama de 3 a 6 dB aproximadamente, con aumentos mínimos de la calidad de funcionamiento en esta gama y a veces con un descenso que parece ser típico en los experimentos de ángulos de elevación bajos. La aparición de ese "aplanamiento" en la característica de la ganancia por diversidad puede deberse a la presencia simultánea de dos células de lluvia distintas sobre las dos estaciones terrenas. Sin embargo, también es muy probable que si continuaran las mediciones durante varios años, la porción plana quedara fundida en la característica global, produciendo un aumento monótono de la ganancia por diversidad con atenuación en un solo emplazamiento [Witternigg y otros, 1987].

Por consiguiente, se considera que el aplanamiento aparente o característica no monótona, observado en los experimentos de diversidad de emplazamientos con ángulo de elevación bajo, se debe a errores de muestreo (datos insuficientes para dar un resultado estable). Sin embargo, parece evidente que la calidad de funcionamiento en diversidad resulta degradada a medida que disminuye el ángulo de elevación del trayecto y, según muestra la figura 3.10, ese ángulo de elevación puede ser una consideración dominante en el caso de los trayectos con ángulos de elevación inferiores a unos 15°. Para mayores ángulos de elevación, la calidad de funcionamiento en diversidad tiene sólo una ligera dependencia del ángulo de elevación del trayecto.

3.3.1.7.4 Dependencia con la frecuencia

Se prevé que la calidad de funcionamiento por diversidad disminuirá al aumentar la frecuencia porque se incrementará el efecto de las estructuras de intensidad de lluvia baja y extensa sobre los valores estadísticos del trayecto único. Esos fenómenos extensos guardan más correlación en distancias largas, con lo cual disminuye la descorrelación entre los trayectos. Sin embargo, las mediciones iniciales de la ganancia por diversidad en frecuencias comprendidas entre 11 y 30 GHz mostraron que la ganancia parecía ser casi independiente de la frecuencia [Goldhirsh y Robison, 1975; Hodge y otros, 1976]. Un análisis ulterior [Hodge, 1982] de la dependencia de la ganancia por diversidad respecto a la frecuencia residual aparente (tras haber suprimido los efectos estimados de la separación de emplazamientos) también dio una débil dependencia. Si bien la dependencia de la ganancia por diversidad respecto a la frecuencia no se ha ensayado en trayectos de ángulo de elevación bajo, es probable que en esos trayectos sean importantes los efectos de la frecuencia, en particular por encima de 30 GHz, en donde los efectos de los gases y las nubes pasan a ser importantes en términos de atenuación en el trayecto.

3.3.1.7.5 Efectos de la topografía y meteorología locales

En la calidad de funcionamiento por diversidad puede influir también el terreno local, ya que las peculiaridades topográficas modifican a menudo las características de la lluvia [Harrold y Austin, 1974], como se indicó anteriormente [Strickland, 1977]. Pueden producirse aumentos por la lluvia [Strickland, 1977] y "sombra" por lluvia [MacKenzie y Allnutt, 1977]. Esos efectos orográficos pueden preverse en general, aunque será difícil predecir su magnitud. La interposición entre los emplazamientos de características geográficas significativas (una colina, un río, un lago, etc.) aumentará siempre la descorrelación entre los emplazamientos [Szuppa y otros, 1993].

El establecimiento de un par de terminales de diversidad con una diferencia notable de altura respecto al nivel medio del mar [Otsu y otros, 1978] puede permitir que se alcance una ganancia por diversidad superior a la normal, debido al trayecto notablemente inferior que sigue el terminal más alto en la troposfera. Ese resultado puede no producirse siempre [Misme y Waldteufel, 1982] y la posible ventaja de la localización de un terminal en una montaña puede eliminarse por problemas logísticos, de tiempo adverso y otros. Sin embargo, no cabe duda de que es preferible cierta

separación en altura (afín a la existente en el funcionamiento por diversidad espacial en la línea de visibilidad terrenal) en ángulos de elevación inferiores a 3° en latitudes altas [Mimis y Smalley, 1982; Gutteburg, 1983; Bryant, 1992].

3.3.2 Distribución estadística del nivel de la señal en zonas extensas

Los futuros sistemas de satélites que funcionen simultáneamente con un amplio número de estaciones terrenas muy dispersas podrán utilizar el tratamiento a bordo para distribuir recursos adicionales en forma dinámica entre las estaciones terrenas, requiriendo márgenes o capacidad adicional de enlace. Ese esquema es el funcionamiento AMDT con compartición de recursos [Acampora, 1981, v Hugo y Wilde, 1994], en el que puede asignarse a los usuarios que necesitan recursos extraordinarios, un conjunto de capacidad adicional (porciones de reserva de la trama AMDT). La atribución se hará en forma dinámica y puede estar sometida al control de una estación principal en Tierra o, en las versiones más avanzadas, de una carga útil de tratamiento situada en el propio satélite.

Para calcular la capacidad adicional requerida en un sistema de compartición de recursos, se necesita conocer la probabilidad de aparición de interrupciones conjuntas en las estaciones terrenas. Los estudios de diversidad en gran escala [Barbaliscia y otros, 1988a, 1988b, 1989] muestran que la atribución dinámica de recursos entre un amplio grupo de estaciones terrenas puede reducir notablemente la probabilidad de las interrupciones debidas a la lluvia en las diferentes estaciones terrenas. Sin embargo, los mismos estudios muestran que el supuesto de la independencia estadística entre las distintas estaciones terrenas puede llevar a subestimar la probabilidad de interrupción de funcionamiento de una determinada estación terrena, debido a la correlación de la lluvia que todavía existe entre estaciones terrenas con separaciones de hasta 800 km [Dintelmann y otros, 1993].

Para un sistema de satélite que funciona con N estaciones terrenas y con un número M de recursos comunes adicionales, pueden identificarse dos elementos de diseño:

- a) la probabilidad de "demanda excesiva" del sistema a bordo y sus recursos; y
- b) la probabilidad de que una determinada estación terrena "no sea ayudada" y su jerarquía de prioridad, si existe, entre las N estaciones.

Ambas probabilidades pueden expresarse por la suma ponderada de las probabilidades de eventos de desvanecimiento conjunto para distintas combinaciones de N estaciones [Barbaliscia y otros, 1989].

Para un caso simple de pares de estaciones ($N = 2$, $M = 1$) puede establecerse una aproximación empírica de la probabilidad de acontecimientos conjuntos de lluvia, en función de la distancia d (km) y de un nivel de lluvia comprendido en la gama de 0 a 6 mm/h, del siguiente modo:

$$P_{ij} = A_1 e^{-\left(\frac{d}{D_1}\right)} + A_2 e^{-\left(\frac{d}{D_2}\right)^2} \quad (3.11)$$

con:

Caso 1

$$A_1 = 33 H^{-0,92}$$

$$D_1 = 592 - 22 H \quad \text{en donde } H = \text{intensidad diaria de la lluvia (mm/día)}$$

$$A_2 = 0,2 \quad \text{para } H \leq 20 \text{ mm/día}$$

$$D_2 = 1400$$

Caso 2

$$A_1 = 0,3 R^{-0,6}$$

$$D_1 = 195 - 30 R \quad \text{en donde } R = \text{intensidad de la lluvia (mm/h)}$$

$$A_2 = 0,02 \quad \text{para } R \leq 6 \text{ mm/h}$$

$$D_2 = 500$$

Los parámetros del Caso 1 deben utilizarse cuando se necesita conocer la probabilidad conjunta de aparición de una cantidad acumulativa de lluvia por día. Si se precisa determinar la probabilidad conjunta de una determinada intensidad de la lluvia, deben emplearse los parámetros dados en el Caso 2. Conviene señalar que la intensidad de la lluvia en el Caso 2 da en mm/h, pero es de hecho la intensidad media de la lluvia en el periodo de probabilidad conjunta necesario (para este caso, una hora).

En el caso más general de N estaciones y M recursos se ha establecido un modelo basado en el supuesto de las distribuciones conjuntas log-normales de la lluvia, que muestra buena concordancia con los datos experimentales. Conviene señalar que la distribución log-normal se aplica sólo a la fracción de tiempo en la que la intensidad de la lluvia pasa de cero simultáneamente en la totalidad de las N estaciones terrenas.

3.3.3 Otros esquemas de diversidad

Si no hay posibilidad de aumentar el margen (por ejemplo, mediante la aplicación del control de potencia por medio de la ganancia adicional del transmisor, la potencia del transmisor o el aumento de la atribución de recursos en el sistema AMDT), existen fundamentalmente tres tipos de esquemas de diversidad que pueden utilizar los sistemas de satélite para superar las degradaciones en una determinada estación terrena: diversidad de tiempo, diversidad de frecuencia y diversidad de emplazamiento. Se ha examinado ya la diversidad de emplazamiento, pero existe otra técnica que permite medir la diversidad de trayectos y que es la diversidad orbital. Se exponen a continuación brevemente la diversidad orbital y las otras dos técnicas de diversidad.

3.3.3.1 Diversidad orbital

La diversidad orbital [Capsoni y Matricciani, 1984] es distinta de la diversidad de emplazamiento en el sentido de que sólo se utiliza un emplazamiento de estación terrena. Para alcanzar cierto grado de diversidad, la estación terrena utiliza dos antenas que pueden tener acceso simultáneo a distintos satélites. La diversidad orbital no exige un enlace de interconexión de diversidad entre los emplazamientos, como sucede en la diversidad de emplazamiento, pero para obtener una descorrelación importante de las atenuaciones coincidentes a lo largo de los dos trayectos, debe ser amplio el ángulo comprendido entre los dos trayectos en la estación terrena.

Sin embargo, si ese ángulo es amplio, por lo menos uno de los enlaces, y posiblemente los dos, estará en un ángulo de elevación relativamente bajo y encontrará por ello un mayor grado de degradaciones que en elevaciones más altas. En cualquier caso, la ganancia por diversidad obtenible es bastante baja, situándose en general en un máximo de unos 2 - 3 dB en las bandas de 14/11 GHz.

3.3.3.2 Diversidad de frecuencia

Las pérdidas en el trayecto provocadas por la presencia de partículas aumentan al elevarse la frecuencia, en particular en el caso de la lluvia. En 6/4 GHz, la atenuación debida a la lluvia es despreciable, en 14/11 GHz puede ser importante en las regiones del mundo de alta intensidad de la lluvia, y en 30/20 GHz es el factor dominante de degradación del enlace en casi todas partes. Si es posible conmutar las comunicaciones de una banda a otra de frecuencia inferior, pueden alcanzarse aumentos significativos de la disponibilidad [Mangulis, 1985].

Esa capacidad exige que las dos bandas de frecuencias (la superior, que está degradada, y la inferior, a la que se han de conmutar los canales de comunicaciones) estén simultáneamente disponibles en la estación terrena en cuestión. Además tiene que haber una capacidad de reserva disponible en la banda de frecuencias inferior en el momento en que se necesita, lo que implica que debe proporcionarse una capacidad significativa de reserva si el enlace tiene un canal de alta capacidad y que la totalidad de la red ha de estar sometida a control dinámico. Ambos elementos exigen importantes inversiones. Si se hallan esas características de control dinámico de la red y se dispone de inmediato de capacidad adicional en la banda de frecuencias inferior, la diversidad de frecuencia puede sin duda aumentar notablemente la disponibilidad.

3.3.3.3 Diversidad de tiempo

Los periodos de lluvia intensa no suelen ser prolongados en una localización dada. Esta característica puede utilizarse en cualquier enlace de comunicaciones que no requiere interacción entre el que llama y el receptor. Encaja en esta categoría la transmisión facsímil: si se envía con éxito un fax sin errores en un periodo de dos horas, por ejemplo, puede considerarse que el servicio es aceptable. El retraso en el envío del fax puede considerarse una forma de diversidad de tiempo.

Esta característica puede aprovecharse también para determinar los requisitos de capacidad de un enlace dado a fin de obtener la calidad de funcionamiento óptima desde el punto de vista económico. Si el tamaño de un enlace guarda relación con la capacidad prevista máxima, tendrá capacidad en exceso durante la mayor parte del tiempo. Si pueden retrasarse algunas transmisiones y enviarlas fuera de las horas punta, por ejemplo, podrán disminuir los requisitos de capacidad. Por consiguiente, el retraso de tiempo puede utilizarse en los momentos de máxima capacidad (esto es, el equivalente del bloqueo de llamadas) o cuando la estación terrena está sufriendo una lluvia intensa.

Otra forma de diversidad de tiempo es la aplicación de la reducción de la velocidad de transmisión de los datos para aumentar el margen disponible. En este caso, se retrasa la recepción de la información al disminuir la velocidad de transmisión.

3.4 Características de los fenómenos de precipitación

Las características de los fenómenos de precipitación revisten gran importancia en el diseño y aplicación de técnicas de reducción del desvanecimiento tales como control de potencia, diversidad, codificación y compartición de recursos. Además, deben considerarse al especificar la calidad de funcionamiento de las redes digitales que utilizan enlaces por satélite. La duración del desvanecimiento o el intervalo de tiempo durante el cual la atenuación de la señal rebasa un valor umbral determinado, los intervalos entre episodios de desvanecimiento, los intervalos entre fenómenos de desvanecimiento y la velocidad de variación de la atenuación son las características dinámicas más importantes relativas a los modelos de sistemas por satélite. Cuando se está produciendo un fenómeno de precipitación, el nivel de desvanecimiento varía considerablemente atravesando varias veces un valor umbral de desvanecimiento determinado en un intervalo de tiempo

relativamente breve; los propios fenómenos de precipitación se encuentran separados por un intervalo de tiempo más amplio como se representa en la figura 3.11 [Kumar, 1985; Vogel y otros, 1993]. Un fenómeno de precipitación se inicia cuando el nivel de desvanecimiento rebasa un umbral determinado y finaliza cuando dicho nivel cae por debajo del umbral y va seguido de un largo intervalo durante el cual el nivel de desvanecimiento es próximo al de su valor en cielo despejado. Mientras se está produciendo el fenómeno, pueden aparecer varias crestas de breve duración separadas por diversos intervalos cortos. Las crestas se denominan episodios de desvanecimiento y los intervalos son conocidos como intervalos entre episodios o intervalos entre desvanecimientos. El intervalo de tiempo relativamente largo entre fenómenos de desvanecimiento se conoce con el nombre de intervalo entre sucesos.

A menudo, los fenómenos de precipitación vienen acompañados por centelleo troposférico y las características antes indicadas deben definirse tanto en presencia como en ausencia del centelleo. Las características del centelleo se consideran en el Capítulo 6. Los centelleos son variaciones relativamente rápidas de la amplitud de la señal y mediante filtros paso bajo pueden separarse de las variaciones más lentas provocadas por las partículas de precipitación. A tal efecto, parece adecuado utilizar filtros con constante de tiempo del orden de 120 segundos [Karasawa y Matsudo, 1991]. En la figura 3.12 se representa un ejemplo de separación del centelleo y el desvanecimiento debido a la lluvia utilizando un filtro de promediación desplazable con constante de tiempo de 1 minuto; los datos se han recopilado utilizando una señal de radiobaliza de 11 GHz con un ángulo de elevación de 6,5°.

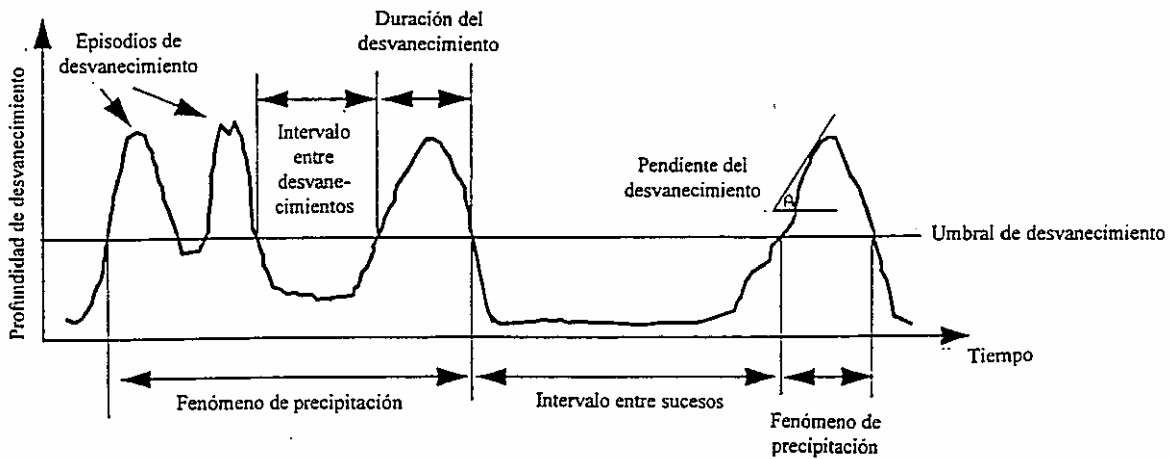
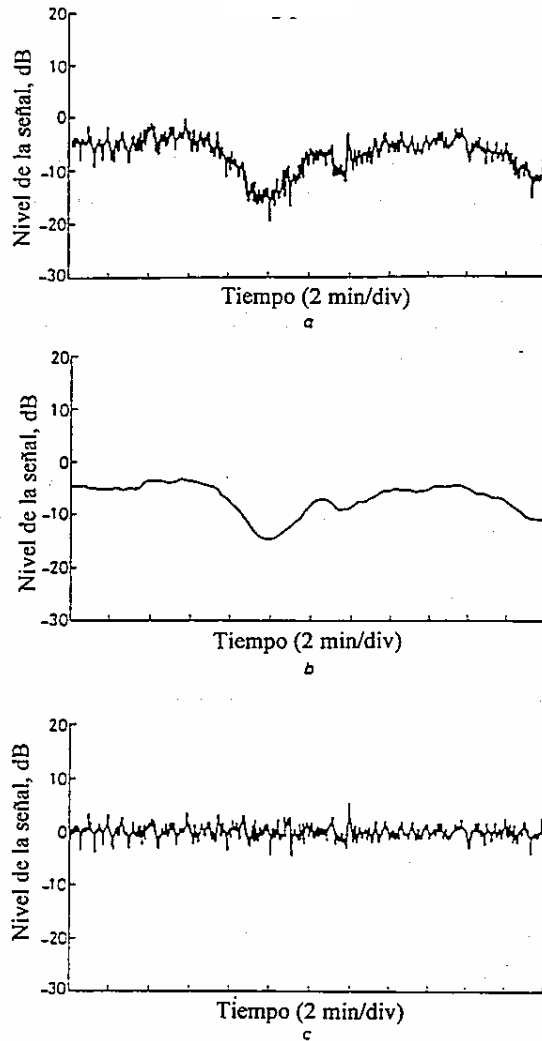


FIGURA 3.11

Parámetros normalmente utilizados para caracterizar los fenómenos de precipitación



- a) Datos originales a 11 GHz con un ángulo de elevación de 6,5°
- b) Datos suavizados con el procedimiento de promediación desplazable a intervalos de 1 minuto (atenuación a 11 GHz)
- c) Diferencia entre los datos originales y suavizados (centelleo a 11 GHz)

FIGURA 3.12

Separación del centelleo y del desvanecimiento debido a la lluvia según [Allnutt, 1989], basándose en los trabajos originales de Karasawa

3.4.1 Duración de los distintos desvanecimientos

Por regla general, la duración del desvanecimiento es función de la frecuencia, del ángulo de elevación y del tipo de lluvia. Para un umbral de desvanecimiento dado, la duración del desvanecimiento aumentará al crecer la frecuencia y al disminuir el ángulo de elevación. La evidencia experimental demuestra que estas dependencias siguen aproximadamente la dependencia de la atenuación debida a la lluvia con la frecuencia y el ángulo de elevación [Kumar, 1985; Allnutt, 1989]. Por consiguiente, la dependencia de la duración del desvanecimiento con la frecuencia, para un ángulo de elevación fijo, viene dada aproximadamente por la siguiente expresión:

$$\frac{\text{N}^\circ \text{ total de desvanecimientos con } A > x \text{ dB para } f_1}{\text{N}^\circ \text{ total de desvanecimientos con } A > x \text{ dB para } f_2} \approx \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \quad (3.12)$$

siendo A la profundidad del desvanecimiento (dB), x el valor umbral (dB) a partir del cual se considera que hay desvanecimiento y f la frecuencia. En la Recomendación UIT-R P.618 figura una ley de proporcionalidad con la frecuencia más rigurosa. La dependencia con el ángulo de elevación para una frecuencia fija puede aproximarse mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\text{N}^\circ \text{ total de desvanecimientos} > A \text{ para } \theta_1}{\text{N}^\circ \text{ total de desvanecimientos} > A \text{ para } \theta_2} \approx \frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } \theta_1} \quad (3.13)$$

siendo θ el ángulo de elevación.

La dependencia con el ángulo de elevación mostrada en la ecuación (3.13) es válida únicamente para ángulos de elevación moderados a altos donde el desvanecimiento es producido por células de lluvia individuales. Para ángulos de elevación bajos, en el proceso de desvanecimiento interviene a menudo más de una célula de lluvia, lo que da lugar a una dependencia más compleja con el ángulo de elevación.

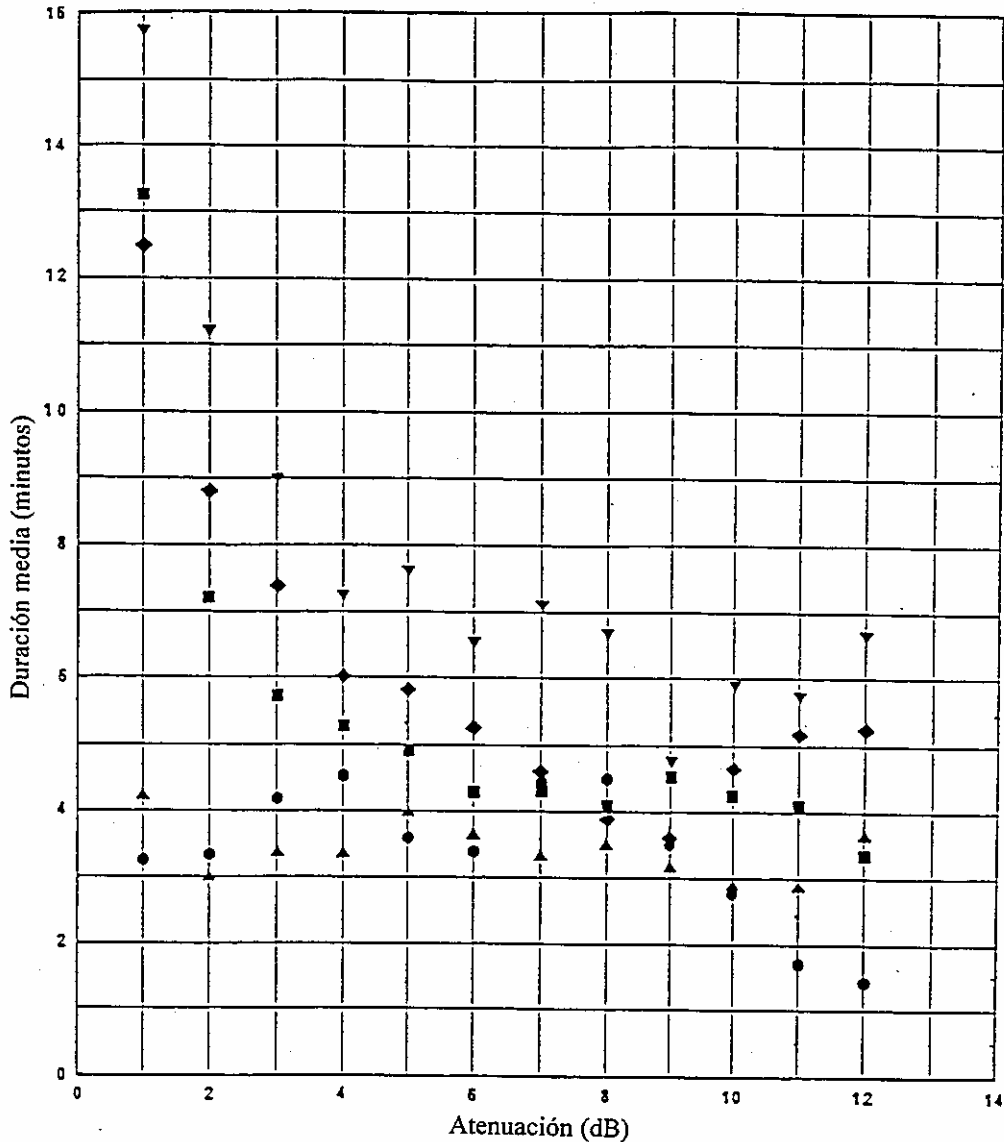
La influencia del tipo de lluvia en la duración del desvanecimiento se deriva directamente del tiempo de permanencia medio de las estructuras de lluvia. Las lluvias ligeras suelen tener tiempos de permanencia más largos que las lluvias torrenciales.

La duración media de los desvanecimientos que rebasan un valor umbral determinado parece ser independiente del nivel de dicho umbral. Ello se debe al hecho de que el número de desvanecimientos aumenta al disminuir el umbral de desvanecimiento sin que exista ninguna relación evidente entre ambos parámetros. El porcentaje de tiempo más largo durante el cual se rebasa un umbral de desvanecimiento más bajo se distribuye a lo largo de un número elevado de desvanecimientos y el porcentaje de tiempo más bajo para un umbral de desvanecimiento más elevado se distribuye entre un número más reducido de desvanecimientos. En la figura 3.13, basada en datos extraídos de [Flavin, 1982], se representa un ejemplo de duración media del desvanecimiento.

Para la mayoría de los umbrales de desvanecimiento, la duración media del desvanecimiento es de aproximadamente 5 minutos, como se refleja en la figura 3.13. Este valor es típico para la mayoría de los trayectos y climas con la salvedad de las regiones sujetas a fenómenos naturales extremos y violentos tales como tifones. La dispersión de la duración del desvanecimiento alrededor del valor medio aumenta al disminuir el umbral de desvanecimiento. Como ejemplo puede decirse que es habitual observar desvanecimientos de más de una hora de duración para un umbral de 3 dB en frecuencias superiores a unos 14 GHz; por otro lado, es menos probable que un desvanecimiento de 20 dB dure más de tres o cuatro veces el valor medio. Esa situación se ilustra mediante los valores estadísticos de la duración del desvanecimiento representados en la figura 3.14 [Cox y Arnold, 1982]. Las curvas muestran el número medio de desvanecimientos por año con duración igual o superior al valor de la abscisa y están representadas con y sin histéresis de 1 dB. La utilización de histéresis suprime fundamentalmente las fluctuaciones de señal rápidas debidas a los efectos del equipo y, en cierto grado, al centelleo troposférico. La supresión de desvanecimiento de corta duración para umbrales de 5 y 10 dB mediante histéresis es evidente. También es evidente la presencia de un gran número de desvanecimientos de larga duración para umbrales inferiores. Ambos efectos desaparecen para profundidades de desvanecimiento de 20 dB o superiores.

Los datos medidos indican que la duración de los desvanecimientos que rebasan un umbral determinado presenta una distribución log-normal de desvanecimientos de mayor duración compuesta fundamentalmente por desvanecimientos causados por la lluvia [Lin y otros, 1980;

Dissanayake y otros, 1990]. Los desvanecimientos de duración más breve, causados normalmente por el centelleo troposférico, pueden representarse por una distribución de ley exponencial [Paraboni y Riva, 1994]. En el banco de datos de la CE 3 del UIT-R figuran ejemplos de distribuciones de duración del desvanecimiento similares a los representados en la figura 3.14 (véase la Recomendación UIT-R P.311). Si no se dispone de los datos medidos adecuados, para predecir las distribuciones de la duración del desvanecimiento puede utilizarse el modelo empírico descrito en [Paraboni y Riva, 1994].



- ▼ Darwin, Australia 14 GHz $\theta = 60^\circ$ (Noviembre 1977-Mayo 1979)
- ◆ Darwin, Australia 11 GHz $\theta = 60^\circ$ (Noviembre 1977-Mayo 1979)
- Innisfail, Australia 11 GHz $\theta = 45^\circ$ (Octubre 1978-Abril 1979)
- ▲ Melbourne, Australia 14 GHz $\theta = 45^\circ$ (Junio 1980-Junio 1983)
- Melbourne, Australia 11 GHz $\theta = 45^\circ$ (Junio 1980-Junio 1983)

FIGURA 3.13

Duración media del desvanecimiento en función del nivel de desvanecimiento [Flavin, 1982]

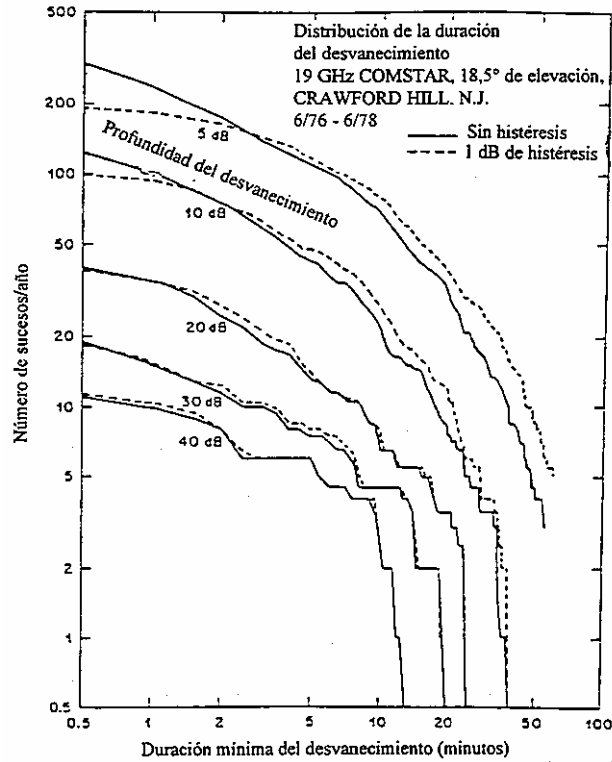


FIGURA 3.14

**Distribución acumulativa de la duración del desvanecimiento
[Cox y Arnold, 1982]**

3.4.2 Intervalos entre desvanecimientos y entre sucesos

La información sobre los intervalos entre desvanecimientos es importante en aplicaciones tales como conmutación por diversidad en las cuales una repetición excesiva de conmutaciones puede tener un efecto negativo en la calidad de funcionamiento del sistema. Los intervalos entre sucesos, que corresponden al periodo de retorno de los sucesos de precipitación, revisten gran importancia en la gestión de la red y en la reatribución de recursos a gran escala.

Por regla general, los intervalos entre desvanecimientos inducidos por la lluvia y los intervalos entre sucesos presentan una distribución log-normal [Kumar, 1985; Vogel y otros, 1993]. Sin embargo, cabe esperar que los intervalos entre desvanecimientos de breve duración causados por el centelleo troposférico sigan una distribución de ley exponencial al igual que la duración del desvanecimiento a corto plazo.

En la figura 3.15 se representa un ejemplo donde se muestran por separado las distribuciones para los intervalos entre desvanecimientos y entre sucesos [Vogel y otros, 1993]. Los datos proceden de un experimento realizado con una radiobaliza a 11,2 GHz funcionando con un ángulo de elevación de 5,8°. Los datos se han analizado utilizando una separación en cielo despejado mínima de 4,2 horas para separar los intervalos entre sucesos y los intervalos entre episodios o los intervalos entre desvanecimientos. Se determinó que el valor mediano del intervalo entre sucesos entre desvanecimientos de 20 dB era de 9,27 días. Para el umbral de 20 dB se obtuvo un valor central del 90% de los intervalos entre desvanecimientos comprendido entre 80 segundos y 1,7 horas. También puede verse en la figura el número medio de sucesos por año y el número de episodios de desvanecimiento por suceso. Como puede observarse, el número de episodios de desvanecimiento por suceso aumenta al disminuir el umbral de desvanecimiento.

En la figura 3.16 se representa un ejemplo de la distribución combinada de intervalos entre desvanecimientos y entre sucesos obtenida mediante un experimento con una radiobaliza de satélite de 19 GHz [Cox y Arnold, 1982]. Las curvas muestran el número de intervalos por año con duración igual o superior al valor de la abscisa y se han trazado con y sin histéresis de 1 dB. Como se indicó anteriormente, la histéresis fundamentalmente elimina las fluctuaciones de señal rápidas debidas a los efectos de los equipos y, en cierto grado, al centelleo troposférico. Puede comprobarse que la pendiente de la distribución varía con la profundidad del desvanecimiento. Los umbrales de desvanecimiento más elevados se caracterizan por intervalos más largos compuestos principalmente de intervalos entre sucesos mayores de 6 horas. Los umbrales de desvanecimiento más bajos muestran una variabilidad mucho más amplia y casi la mitad de los intervalos para el umbral de 5 dB presentan una duración inferior a 1 hora.

Utilizando las relaciones señaladas en el punto anterior relativas a la duración del desvanecimiento puede realizarse una interpolación de los intervalos entre desvanecimientos para diversas frecuencias y ángulos de elevación.

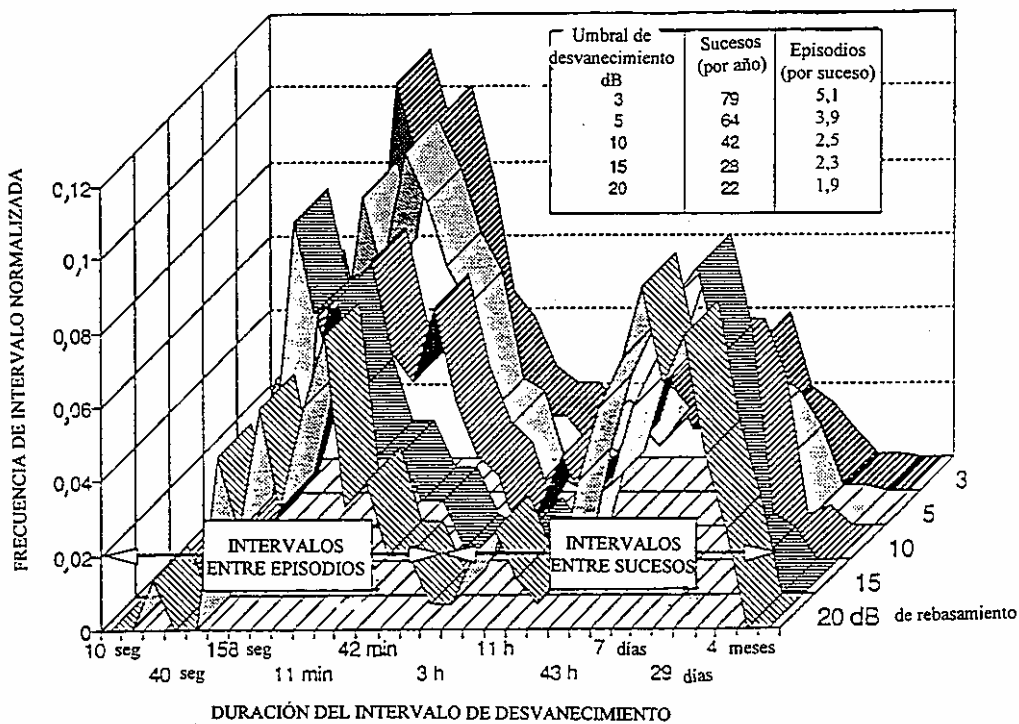


FIGURA 3.15

Histogramas de duración del intervalo para desvanecimientos debidos a la lluvia [Vogel y otros, 1993]

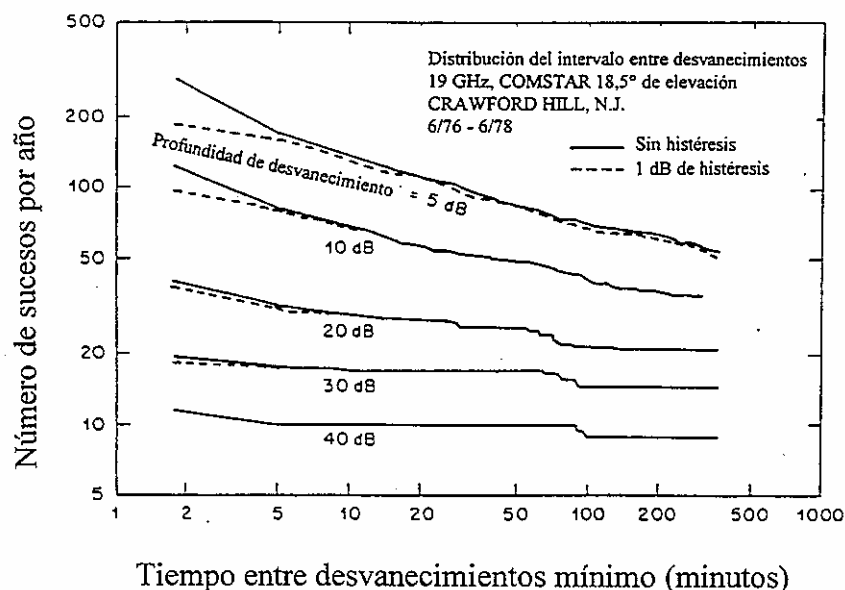


FIGURA 3.16
Distribución acumulativa de los intervalos entre desvanecimientos
[Cox y Arnold, 1982]

3.4.3 Tasas de cambio de la atenuación

La tasa de cambio de la atenuación normalmente se estima sólo para desvanecimientos debidos a la lluvia tras suprimir la mayoría de las fluctuaciones de la señal causadas por el centelleo troposférico. Como se ha determinado para los valores estadísticos de duración del desvanecimiento debido a la lluvia, la distribución de la tasa de cambio de la atenuación parece seguir una distribución log-normal con un valor mediano de 0,1 dB/s. Dicha tasa aumenta al hacerlo la frecuencia de funcionamiento. Se ha observado una similitud en las distribuciones de las pendientes positiva (desvanecimiento) y negativa (recuperación). Sin embargo, es evidente que a medida que aumenta la velocidad de desvanecimiento, la diferencia entre la pendiente del desvanecimiento y la pendiente de recuperación tiende a aumentar, siendo siempre mayor la pendiente del desvanecimiento. La explicación física a este hecho podría ser que las velocidades de desvanecimiento más elevadas están asociadas a tormentas y que los frentes anteriores de las tormentas presentan índices de pluviosidad más elevados que los frentes posteriores.

En la figura 3.17, procedente de [Baptista y Davies, 1994], se representan las distribuciones acumulativas de las tasas de cambio de la atenuación o las pendientes de desvanecimiento obtenidas mediante un experimento de medición con radiobaliza para una frecuencia de 30 GHz y un ángulo de elevación de 26,8°. Las distribuciones se refieren al valor absoluto de la pendiente sin considerar los desvanecimientos positivos o negativos. La figura muestra las distribuciones para tres gamas de desvanecimiento. Puede observarse que la probabilidad de que aparezcan tasas de cambio de la atenuación más elevadas aumenta al hacerlo la atenuación. Otros investigadores han observado tendencias similares [Prat y otros, 1993; experimentos realizados por Baptista y Davies, 1994]. Las pendientes del desvanecimiento para otras frecuencias pueden estimarse utilizando las relaciones de extrapolación con la frecuencia que figuran en la Recomendación UIT-R P.618.

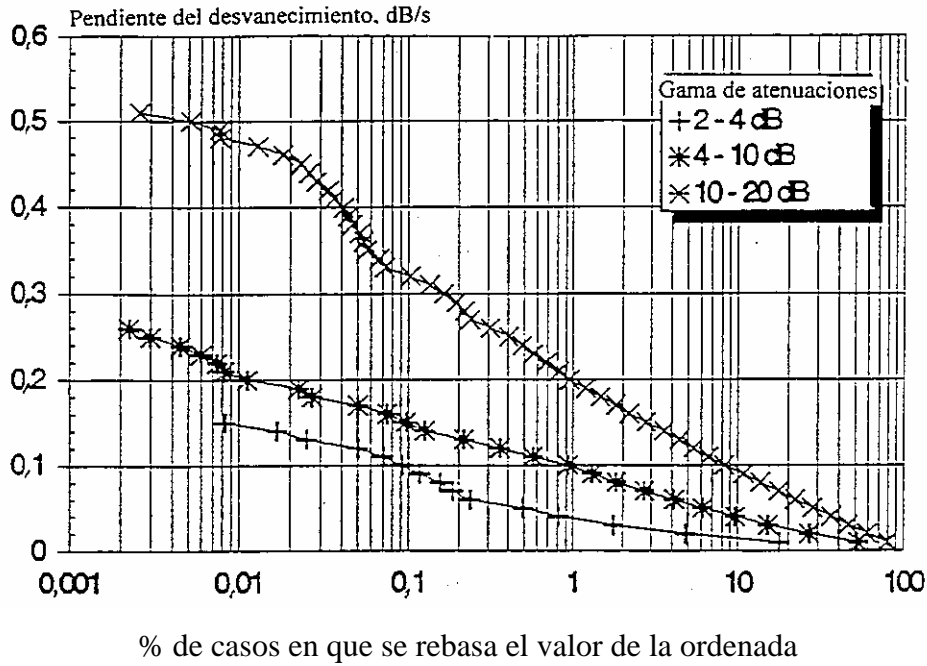


FIGURA 3.17

**Distribución acumulativa de las pendientes del desvanecimiento a 30 GHz
[Baptista y Davies, 1994]**

3.4.4 Correlación entre los valores instantáneos de la atenuación a distintas frecuencias

Al comparar las atenuaciones instantáneas medidas simultáneamente a distintas frecuencias, debe tenerse en cuenta que en la mayoría de los casos se está observando el efecto combinado de diversos mecanismos de atenuación. Por consiguiente, para que sea significativa la comparación debe limitarse al efecto de una atenuación únicamente. En el caso de atenuación debida a la lluvia ello exigiría una corrección para las componentes de absorción gaseosa y por las nubes. Sin embargo, si la lluvia es el componente dominante de la atenuación, los otros efectos son menos importantes al aumentar la atenuación debida a la lluvia.

Con sus radiobalizas 12,5; 20 y 30 GHz, el OLYMPUS ha permitido realizar una comparación de atenuaciones instantáneas medidas simultáneamente. Al representar la atenuación $A(f_1)$, medida a la frecuencia de radiobaliza f_1 en función de la atenuación medida simultáneamente $A(f_2)$, a la frecuencia f_2 , se ha observado un alto grado de correlación si bien a menudo ha aparecido una cierta histéresis [Ortgies y otros, 1991]. Este comportamiento tiene una relación inmediata con la de la atenuación con las frecuencias en aplicaciones de control de potencia del enlace ascendente donde sería conveniente utilizar el factor de escala de la atenuación medida instantáneamente. Las causas principales del efecto de histéresis son las variaciones en las distribuciones del tamaño de la gota de agua así como de la longitud del trayecto a través de la lluvia [Ortgies y otros, 1992]. Ello es posible puesto que puede producirse un nivel de atenuación particular a causa del producto de una atenuación específica baja y un trayecto de propagación largo o una atenuación específica alta y un trayecto de propagación corto. En el primer caso, la lluvia de baja intensidad con gotas de pequeño tamaño es la causa de la atenuación y en el segundo, intervienen gotas de lluvia de mayor tamaño. Estas últimas dan lugar a un factor de escala de la atenuación menor que en el caso de gotas pequeñas. Por consiguiente, el cambio observado de factores de escala instantáneos refleja el

desarrollo de un temporal de lluvia. Los valores estadísticos del factor de escala de la frecuencia instantánea para 20-30 GHz se obtuvieron para un periodo de 30 meses y para un periodo de un año en Darmstadt (Alemania) y Virginia Tech (EE.UU.), respectivamente, [Pratt y otros, 1993]. El abrupto incremento del factor de escala observado para valores bajos de la atenuación a 20 GHz puede explicarse por la atenuación producida por el vapor de agua y las nubes.

La variabilidad en el tiempo de los procesos de atenuación tiene una consecuencia inmediata sobre la proporcionalidad de la atenuación. Las aplicaciones que requieran una mayor precisión que la que puede lograrse con un factor de escala constante deben basarse en la supervisión de una señal de radiobaliza adicional cuya frecuencia sea próxima a la de la atenuación que va a medirse.

3.5 Efectos de la arena y el polvo

3.5.1 Consideraciones generales

La atmósfera contiene una cierta variedad de partículas sólidas en suspensión. Estas partículas tienen tamaños que oscilan entre los aerosoles (hasta 50 μm) y el polvo grueso, conocido a veces con el nombre de arena (aproximadamente 1 mm [Miller y Anthes, 1981]). Cuanto mayor sea el tamaño de las partículas más rápidamente precipitan del estado de suspensión. Los aerosoles pueden permanecer en el aire durante días y, a veces, durante años, pero el polvo grueso caerá rápidamente sobre la superficie una vez que haya desaparecido la causa que lo impulsó, como por ejemplo un huracán. De forma similar, los aerosoles pueden verse proyectados hasta la estratosfera incluso con ligeras corrientes ascendentes mientras que las partículas de mayor tamaño, como el polvo grueso, generalmente permanecen a unos pocos metros de la superficie terrestre.

Los aerosoles y las partículas sólidas pequeñas no afectan de forma significativa la transmisión de las ondas electromagnéticas hasta aproximarse a las frecuencias ópticas cuando su sección transversal de atenuación empieza a ser apreciable. El efecto del polvo fino y grueso en la transmisión radioeléctrica puede ser apreciable a frecuencias mucho menores, aunque generalmente es difícil separar estos efectos de los debidos a los fenómenos meteorológicos que acompañan a menudo a las tormentas de polvo. En muchos casos, los fuertes vientos que generan una tormenta de polvo pueden causar el desapuntamiento de la antena, lo cual provocará una pérdida de la intensidad de la señal difícil de distinguir del efecto de la atenuación provocada por las partículas de polvo. En otros casos, el aumento de la humedad o incluso la lluvia que puede acompañar a una fuerte actividad convectiva en una región árida puede dar lugar a que las partículas de polvo provoquen atenuaciones más intensas que en el caso de una atmósfera seca, debido a la absorción de agua por la estructura de cristal de las propias partículas.

3.5.2 Categorías de tormentas de polvo

Gracias a una amplia investigación de los efectos de las partículas de arena y polvo sobre las señales en las bandas de 6/4 GHz y 14/11 GHz en los trayectos satélite-superficie [McEwan y otros, 1985] se ha establecido una clara distinción entre los efectos del polvo y de la arena, que se resume en el cuadro 3.1. Obsérvese que las partículas de arena se encuentran limitadas generalmente a una altura de 10 m con respecto a la superficie de la Tierra y, por consiguiente, su influencia en los enlaces satélite-superficie debido a los efectos de propagación normalmente es insignificante para ángulos de elevación superiores a 5°. En la citada investigación se han identificado ocho tipos distintos de tormentas de polvo: vientos planetarios, vientos ciclogénicos, vientos catabáticos, tempestades de polvo, vientos de constricción, remolinos y vientos diurnos. Los ocho tipos de tormentas de polvo se clasificaron según las velocidades medias del viento, las velocidades máximas de las ráfagas, la

anchura media de la tormenta, la longitud media de la tormenta y la altura eficaz de la tormenta. En el cuadro 3.2 figura un resumen de estos datos y la figura 3.18 representa las principales regiones desérticas del mundo con los emplazamientos y direcciones de movimiento de las tormentas de polvo. En dicha figura las zonas más oscuras son las fuentes principales de tormentas; las zonas sombreadas más claras son los desiertos de la Tierra; las regiones indicadas mediante líneas discontinuas son zonas marítimas donde pueden aparecer brumas debidas al polvo durante periodos superiores a 10 días en cualquier época del año; las flechas indican las direcciones generales de desplazamiento de las tormentas de polvo; "C" señala las zonas afectadas por tempestades de polvo y "D" indica las zonas no clasificadas como desiertos pero donde pueden producirse tormentas de polvo.

Una tempestad de polvo es el resultado directo de una tormenta generada por una corriente de aire descendente fría y de gran intensidad. Por esa razón, a las tempestades de polvo se las conoce a veces con el nombre de tempestades de polvo frío. Las fuertes turbulencias y ráfagas que se producen en una tempestad de polvo producen una elevada densidad de partículas de polvo en suspensión, lo que provoca una reducción significativa de la visibilidad (óptica). Por esa razón, la visibilidad óptica se ha utilizado como un mecanismo de clasificación de las tormentas de polvo.

El criterio principal aplicado para definir la aparición de una tormenta de polvo es la reducción de la visibilidad a menos de 1 km. Utilizando este criterio, se ha determinado que en las diversas regiones del mundo donde se observan estos efectos se produce una actividad de tormentas de polvo comprendida entre 0,1 y 174 días al año. En el cuadro 3.2 se indican las visibilidades típicas y la duración esperada para las ocho tormentas de polvo indicadas anteriormente. Como la extinción óptica es un parámetro relativamente fácil de medir, se ha intentado establecer modelos de atenuación de microondas en las tormentas de polvo a partir de los datos de visibilidad.

CUADRO 3.1

Diferencias fundamentales entre las partículas de arena y de polvo

	Arena	Polvo
Límites de diámetro	> 10 μm , generalmente < 100 μm	< 10 μm
Altura máxima habitual por encima del suelo	< 10 m	> 1 000 m
Contenido en silicio	> 80 %	< 55%
Contenido en óxido de hierro	~ 7%	20 - 30%
Cantidad de agua absorbida en aire con humedad relativa del 91%	< 1%	6 - 9%

CUADRO 3.2

Clasificaciones de ocho tormentas de polvo indicando las velocidades de viento típicas así como las estructuras, la visibilidad y la duración [McEwan y otros, 1985]

Tipo de tormenta	Velocidad media del viento (m/s)	Máxima velocidad de ráfaga (m/s)	Anchura (km)	Longitud (km)	Altura (km)	Visibilidad esperada	Duración del fenómeno
1) Vientos planetarios	6 - 17	23	0,3 - 250	40 - 8000	0,4 - 3	10 m - < 11 km	< 24 h - 2 semanas
2) Vientos ciclogénicos	7 - 18	27 - 50+				0 - < 1 000 m (0 - 50 m en caso de tormentas intensas)	6 - 24 h
a) corriente en chorro de bajo nivel			500 - 1 000	500 - 2 000+	3 - 5		
b) corriente en chorro de nivel superior			500 - 1 000	500 - 2 000+	3 - 5		
c) circulación de tormenta en la superficie			50 - 150	50 - 150	0,4 - 0,8		
3) Frontal	9 - 17	38	500 - 1 000	50 - 2 000+	1 - 5	0 - < 1 000 m (0 - 50 m en tormentas intensas)	1 - 8 h
4) Vientos catabáticos	12 - 21	36 - 50+	15 - 150	100 - 450	1 - 5	3 - < 1 000 m	0,5 - 18 h
5) Tempestad de polvo	11 - 21,5	41	3 - 75	3 - 300	0,5 - 12	200 - 400 m (0 - 50 m en caso de tormentas intensas)	0,5 - 6 h
6) Vientos de constricción	14	18	0,5 - 10	Longitud del valle	Altura del valle	800 - 1 000 m (3 m en tormentas intensas)	0,5 horas
7) Remolinos	5 - 10	15	0,01 - 0,5	Localizados	0,5 - 3	< 1 000 m	0,1 - 0,5 h
8) Ciclo de viento diurno	8 - 13	15	0,1 - 50	1 - 40	< 1	< 1 000 m (Casi nula en tormentas intensas)	< 1 h

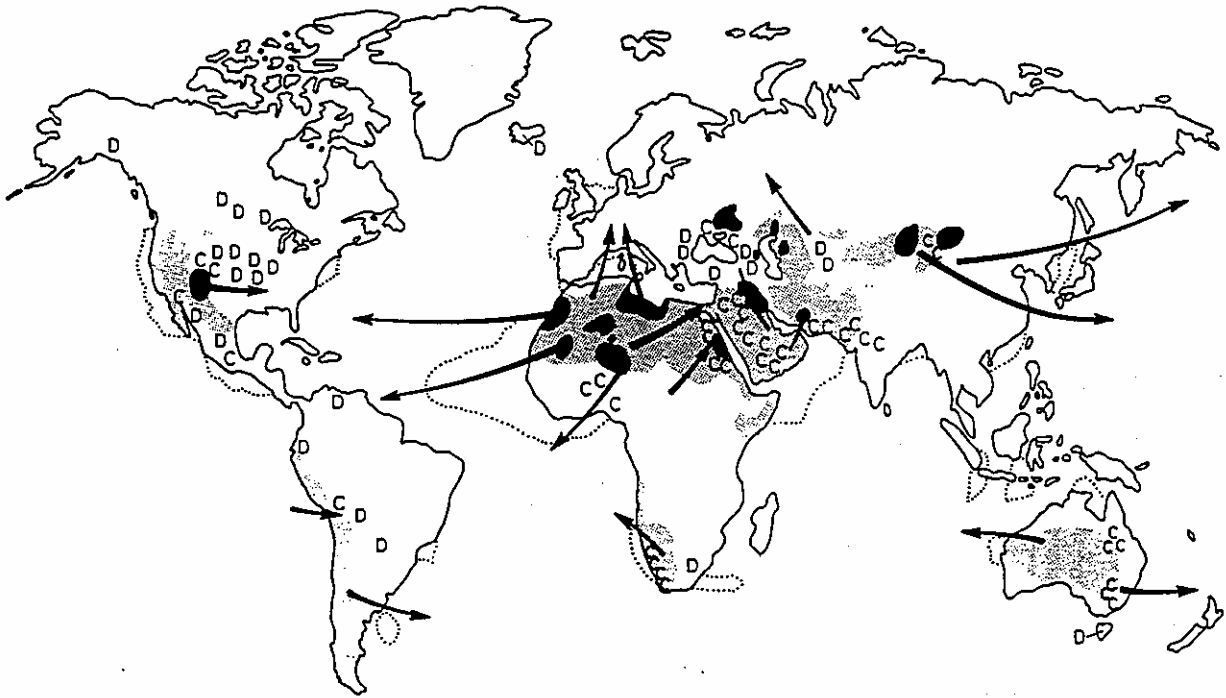


FIGURA 3.18

**Origen y direcciones de desplazamiento de las principales tormentas de polvo
[McEwan y otros, 1985]**

3.5.3 Modelos de predicción de las degradaciones en la propagación causadas por el polvo

Chepil y Woodruff [Chepil y Woodruff, 1957] han elaborado una expresión que se utiliza normalmente para relacionar la masa de polvo suspendida, ρ , con la visibilidad V (en km).

$$\rho = \frac{56 \times 10^{-9}}{V^{1,25}} \quad \text{gramos/cm}^3 \quad (3.14)$$

La visibilidad es la existente a dos metros sobre el suelo. N , es el número de partículas por metro cúbico, de radio a (en metros), puede relacionarse con la visibilidad V (en km) mediante la fórmula siguiente [Flock, 1987]:

$$N = \frac{5,51 \times 10^{-4}}{Va^2} \quad (3.15)$$

La densidad de partículas disminuye con la altura y para calcular los efectos integrados a lo largo del trayecto oblicuo hacia un satélite es preciso determinar la longitud de trayecto efectiva de la misma forma que en el caso de la atenuación debida a la lluvia. Un modelo mediante el que se obtiene una longitud de trayecto efectiva [McEwan y otros, 1986] supone que la tormenta se encuentra contenida en el interior de un cilindro de 10 km de diámetro repartiéndose el polvo uniformemente de manera horizontal, disminuyendo de forma exponencial con la altura en el interior del cilindro y siendo despreciable fuera del mismo. Si k_r y k_i son las partes real e imaginaria de la constante dieléctrica

relativa compleja de las partículas de polvo, respectivamente, la atenuación específica α_p puede expresarse mediante la siguiente fórmula [Flock, 1987]:

$$\alpha_p = \frac{189a}{V\lambda} \left(\frac{3k_i}{(k_r + 2)^2 + k_i^2} \right) \text{ dB/km} \quad (3.16)$$

siendo λ la longitud de onda en metros. Las ecuaciones para N y α_p suponen que las partículas de polvo tienen un radio uniforme. Esta situación no sólo es improbable sino que además las partículas presentarán distintas orientaciones. Esta asimetría puede afectar de forma muy significativa a los efectos de despolarización de un conjunto de partículas de polvo. Las mediciones de la excentricidad de las partículas de polvo [McEwan y otros, 1983; Ghobrial y Sharief, 1987] han dado como resultado un valor medio de 0,71 para la relación entre el eje menor horizontal y el eje mayor horizontal y unos valores de 0,57 [McEwan y otros, 1983] y 0,53 [Ghobrial y Sharief, 1987] para la relación entre el eje menor vertical y el eje mayor vertical. Esta excentricidad, unida al probable alineamiento neto de los cristales provocado por las fuerzas aerodinámicas [McEwan y otros, 1983] y eléctricas [Ghobrial y Sharief, 1987], hará que en algunos casos los efectos de la despolarización sean significativos, especialmente en trayectos con ángulo de elevación bajo.

3.5.4 Resultados típicos de la predicción de las degradaciones en la propagación

En el cuadro 3.3 (de la figura 16 de [Abdulla y otros, 1986]) y el cuadro 3.4 (de la figura 1 de [McEwan y otros, 1986]) aparecen algunos resultados típicos de las predicciones de atenuación y despolarización. El cuadro 3.3 supone que las partículas de polvo circulares presentan una distribución uniforme. El cuadro 3.4 supone las excentricidades indicadas anteriormente para las partículas de polvo y presupone que las partículas se encuentran completamente alineadas con acimutes equiprobables. La humedad es del 0% y la altura de la antena de 20 m.

CUADRO 3.3

Atenuación específica en dB/km para una visibilidad de 10 m a la frecuencia indicada

Frecuencia:	1 GHz		3 GHz		10 GHz		30 GHz	
g H ₂ O/g suelo:	0,3%	10%	0,3%	10%	0,3%	10%	0,3%	10%
Atenuación específica:	0,001	0,004	0,003	0,02	0,01	0,07	0,03	0,6

CUADRO 3.4

Discriminación por polarización cruzada a la frecuencia de 14 GHz

Ángulo de elevación:	5°	10°	20°	30°
10 m de visibilidad:	22	25	31	36
5 m de visibilidad:	16	17	26	30
2 m de visibilidad:	10	14	20	24

Del cuadro 3.3 puede deducirse que si se supone una longitud de trayecto efectiva de 3 km, la atenuación no toma un valor significativo hasta que se utilizan frecuencias de la banda Ka (30/20 GHz); incluso en ese caso, sólo en aire relativamente húmedo, con un 10% de contenido de agua, el valor de la atenuación en el trayecto se aproxima a 2 dB. Para la despolarización, los valores de la discriminación por polarización cruzada (XPD) son relativamente ligeros hasta que la visibilidad toma un valor muy reducido (2 m) y el ángulo de elevación un valor bajo. Sin embargo, si el aire se humidifica y las partículas de polvo absorben la humedad, los valores de XPD empeoran unos 5 dB. En algunos trayectos (con ángulos de elevación inferiores a 10°) y para algunas frecuencias (> 10 GHz), la aparición de tormentas de polvo intensas que contengan una amplia proporción de partículas húmedas puede provocar una caída de la XPD por debajo de 12 dB, valor por debajo del cual se considera generalmente que la posible interferencia puede provocar dificultades. Sin embargo, por regla general en los trayectos satélite-superficie las degradaciones en las ondas radioeléctricas provocadas por las tormentas de arena y polvo representan un problema de mucha menos importancia que las dificultades mecánicas que pueden causar, como por ejemplo las ráfagas de viento intensas y el polvo en los equipos de alimentación de antena y equipos auxiliares.

REFERENCIAS PARA EL CAPÍTULO 3

- ABDULLA, S.A.A., AL-RIZZO, H.M. y CYRIL, M.M. [1986] Particle-size distribution of Iraqi sand and dust storms and their influence on microwave communications systems, *IEEE Trans.*, AP-36, 114-126.
- ACAMPORA, A.S. [1981] Rain margin improvement using resource sharing in 12 GHz satellite downlink, *Bell System Tech. Journal*, Vol. 60, 167-192.
- ALLNUTT, J.E. [1977] Variation of attenuation and space diversity with elevation angle on 12 GHz satellite-to-ground paths, *Electron. Lett.*, Vol. 13, 346-347.
- ALLNUTT, J.E. [1978] Nature of space diversity in microwave communications via geostationary satellites: a review, *Proc. IEE*, Vol. 125, 369-376.
- ALLNUTT, J.E. [1989] *Satellite-to-Ground Radiowave Propagation*, Peter Peregrinus, IEE, Londres.
- ALLNUTT, J.E. [1993] INTELSAT propagation experiments: the focus and results of recent campaigns, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 81, No. 6, 856-864.
- ALLNUTT, J.E. y SHUTIE, P.F. [1977] Slant-path attenuation and space-diversity results at 30 GHz using radiometer and satellite receivers, *Proceedings of ATS-6 Meeting*, ESTEC, Noordwijk, 6-7 de septiembre de 1977 (ESA SP-131).
- ALTMAN, F.J. y SICHAKE, W. [1956] Simplified diversity communications system for beyond-the-horizon links, *IRE Trans.*, Vol. CS-4, 50-55.
- BAPTISTA, J.P.V. y DAVIES, P.G., editores [1994] *Reference Book on Attenuation Measurement and Prediction: OPEX Second Workshop of the Olympus Propagation Experiments*, Agencia Espacial Europea, ESA WPP-083.
- BARBALISCIA, F., BRUSSAARD, G., PARABONI, A. y RAVAIOLI, G. [1988a] Spatial statistical dependence of rainy events, *URSI-IEEE Symposium*, Syracuse, EE.UU.
- BARBALISCIA, F. y PARABONI, A. [1982] Joint statistics of rain intensity in eight Italian locations for satellite communications networks, *Electron. Lett.*, Vol. 18, 118-119.
- BARBALISCIA, F., PARABONI, A. y RAVAIOLI, G. [1988b] Fading correlation study: Final Report - *ESA Contrato No. 6825/86/NL/DG*, Fondazione Ugo Bordoni 1A1188, Italia.
- BARBALISCIA, F., PARABONI, A. y RAVAIOLI, G. [1989] Analysis and modelling of rain correlation over wide areas, *URSI Commission F Open Symposium*, La Londe Les Maures, Francia.
- BOITHIAS, L. [1989] Frequency scaling for rain attenuation. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 44, 5-6, 186-198.
- BRUSSAARD, G. [1981] Prediction of attenuation due to rainfall on Earth-space links. *Radio Science*, Vol. 16, 5, 745-760.
- BRYANT, D.L. [1992] Low elevation angle 11 GHz beacon measurements at Goonhilly earth station, *BT Technology*, Vol. 10, No. 4, 68-75.

- CAPSONI, C. y MATRICCIANI, E. [1984] Performance of orbital diversity systems and comparisons with site diversity in Earth-space radio links affected by rain attenuation, *AIAA 10th. Communications Satellite Conference*, Orlando, Florida, EE.UU., Documento AIAA 84-0723, 565-570.
- CHEPIL, W.S. y WOODRUFF, N.P. [1957] Sedimentary characteristics of dust storms: 2. Visibility and dust concentration, *Am. J Science*, 255, 104-114.
- COX, D.C. y ARNOLD, H.W. [1982] Results from the 19- and 28-GHz COMSTAR Satellite Propagation Experiments at Crawford Hill, *Proc. IEEE*, Vol. 70, 458-488.
- CRANE, R.K. [1980] Prediction of attenuation by rain. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-28, 9, 1717-1733.
- DINTELMANN, F., ORTGIES, G., SZUPPA, S. y TROMMER, H. [1993] Fade duration and site diversity statistics to assess low-margin system performance at 30 GHz, XXIV Asamblea General de la URSI, Kyoto.
- DISSANAYAKE, A.W., MCCARTHY, D.K., ALLNUTT, J.E., SHEPHERD, R. y ARBESSER-RASTBURG, B. [1990] 11.6 GHz Rain Attenuation Measurements in Peru, *Intl. Jnl. Satellite Comm.*, Vol. 8, 229-238.
- FEDI, F. [1979] Attenuation due to rain on a terrestrial path. *Alta Frequenza*, Vol. 66, 167-184.
- FEDI, F. [1980] Rain attenuation on Earth-satellite links: a prediction method based on point rainfall intensity. *Proc. URSI (Commission F) International Symposium on Effects of the lower atmosphere on radio propagation at frequencies above 1 GHz*, Lennoxville, Canadá.
- FEDI, F. [1981a] Predicting of attenuation due to rainfall on terrestrial links. *Radio Science*, Vol. 16, 5, 731-743.
- FEDI, F. [1981b] A simple method for predicting rain attenuation statistics on terrestrial and Earth-space paths. *Fondazione Ugo Bordononi*, Informe 1B1 081.
- FEDI, F. y PARABONI, A. [1986] A new prediction method for attenuation beyond 10 GHz based on a model of raincells characterized by exponential shape. statistics on terrestrial and Earth-space paths. *Proc. URSI -F*, Durham, EE.UU.
- FLAVIN, R.K. [1982] Rain attenuation considerations for satellite paths in Australia. *Australian Telecom. Research*, Vol. 16, 2, 11-24.
- FLOCK, W.L. [1987] *Propagation effects on satellite systems at frequencies below 10 GHz: A handbook for satellite system design*. NASA Reference Publication 1108(2), 2ª Ed.
- FURGUSSON, A. y ROGERS, R.R. [1978] Joint statistics of rain attenuation on terrestrial and Earth-space propagation paths, *Radio Science*, Vol. 13, 471-479.
- GARCIA-LOPEZ, J.A., HERNANDO, J.M. y SELGA, J.M. [1989] Simple rain attenuation prediction method for satellite radio links. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. 36, 3, 444-448.
- GHOBRIAL, S.I. y SHARIEF, S.M. [1987] 'Microwave attenuation and cross-polarization in dust storms', *IEEE Trans.*, Vol. AP-35, 418-425.

- GOLDHIRSH, J. [1976] Earth-space path attenuation statistics influenced by orientation of rain cells, *Proc. 17th. Conf. on Radar Meteorology*, Seattle, Washington, EE.UU. (American Meteorological Society), 85-90.
- GOLDHIRSH, J. y ROBISON, F.L. [1975] Attenuation and space diversity statistics calculated from radar reflectivity data of rain, *IEEE Trans.*, Vol. AP-23, 221-227.
- GRAY, D.A. [1973] Earth-space path diversity: dependence on baseline orientation, *IEEE G-AP Int. Symp.*, Universidad de Colorado, Boulder, Colorado, EE.UU., 366-369.
- GUTTEBURG, O. [1983] Measurements of atmospheric effects on satellite links at very low elevation angles, *AGARD EPP Symposium on Characteristics of the lower atmosphere influencing radiowave propagation*, Spatind, Noruega, 5-1 to 5-19.
- HALL, J.E. y ALLNUTT, J.E. [1975] Results of site diversity tests applicable to 12 GHz satellite communications, *IEE Conf. Publ. 126*, 156-162.
- HARROLD, T.W. y AUSTIN, P.M. [1974] The structure of precipitation systems - a review, *J. Recherches Atmos.*, Vol. 8, 41-57.
- HODGE, D.B. [1973] The characteristics of millimeter wavelength satellite-to-ground space-diversity links, *IEE Conf. Publ. 98*, 28-32.
- HODGE, D.B. [1974] Path diversity for reception of satellite signals, *J. Recherches Atmos.*, Vol. 8, 443-449.
- HODGE, D.B. [1976] An empirical relationship for path diversity gain, *IEEE Trans.*, Vol. AP-24, 250-151.
- HODGE, D.B. [1978] Path diversity for Earth-space communications links, *Radio Science*, Vol. 13, 481-487.
- HODGE, D.B. [1982] An improved model of diversity gain on Earth-space paths, *Radio Science*, Vol. 17, 1393-1399.
- HODGE, D.B., THEOBALD, D.M. y TAYLOR, D.M. [1976] ATS-6 millimeter wavelength propagation experiment, *Report 3863-6*, ElectroScience Laboratory, Ohio State University, Columbus, Ohio, EE.UU.
- HOGG, D.C. [1967] Path diversity in propagation of millimeter waves through rain, *IEEE Trans.*, Vol. AP-15, 410-415.
- HOGG, D.C. y CHU, T.S. [1975] The role of rain in satellite communications, *Proc. IEEE*, 1308-1331.
- IPPOLITO, L.J., KAUL, R.D. y WALLACE, R.G. [1983] Propagation effects handbook for satellite systems design, *NASA Ref. Publ. 1082(03)*, NASA, Washington, DC, EE.UU.
- KALININ, A.I. [1976] Vliyanie dozhdya na oslableniye radiovoln na trassakh zemlya - ISZ. (Atenuación debida a la lluvia en el trayecto Tierra-espacio). *Elektrosviaz*, 5.
- KARASAWA, Y. y MATSUDO, T. [1991] Characteristics of fading on low-elevation angle Earth-space paths with concurrent rain attenuation and scintillation, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. AP-39, 5, 657-661.
- KUMAR, P.N. [1985] Fade Duration Statistics from COMSTAR 20/30 GHz Beacon Measurement Program, *COMSAT Tech. Review*, Vol. 15, 71-87.

- LEITÃO, M.J. y WATSON, P.A. [1986] Method for prediction of attenuation on Earth-space links based on radar measurements of the physical structure of rainfall. *IEE Proc.*, Vol. 133, 4, 429-440.
- LI, H.J., ZHANG, C.Q., LIAO, L. y ZHANG, G.F. [1987] An improved model for the prediction of rain attenuation statistics. *Proceedings of ICAP 1987*, 226-229.
- LIN, S.H. [1980] Rain attenuation on Earth satellite paths. Summary of 10-year experiments and studies. *BSTJ*, Vol. 59, 2, 183-228.
- LIN, S.H., BERGMANN, H.J. y PARSLEY, M.V. [1980] Rain attenuation on Earth-satellite paths - Summary of 10-year experiments and studies, *BSTJ*, Vol. 59, 183-228.
- MACKENZIE, E.C. y ALLNUTT, J.E. [1977] Effect of squall-line direction on space-diversity improvement obtainable with millimetre-wave satellite radio communications systems, *Electron. Lett.*, Vol. 13, 571-573.
- MAGGIORI, D. [1981] Computed transmission through rain in the 1-400 GHz frequency range for spherical and elliptical drops and any polarization, *Alta Frequenza*, Vol. L, 5, 262-273.
- MANABE, T., IHARA, T., AWAKA, J. y FURUHAMA, Y. [1987] The relationship of raindrop-size distribution to attenuation experienced at 50, 80, 140 and 240 GHz. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. AP-35, 11, 1326-1330.
- MANGULIS, V. [1985] Protection of Ka-band satellite channels against rain fading by spare channels at a lower frequency, *Space Communications & Broadcasting*, Vol. 3, 151-158.
- MASS, J. [1979] Diversity and baseline orientations, *IEEE Trans.*, Vol. AP-27, 27-30.
- MCEWAN, N.J. y BASHIR, S.O. [1983] Microwave propagation in sand and dust storms: the theoretical basis for particle alignment. *International Conference on Antennas and Propagation*, ICAP 83, IEE Conf. Publ. 219, 40-44.
- MCEWAN, N.J., BASHIR, S.O., CONNOLLY, C. y EXCELL, D. [1985] *The effects of sand and dust particles on 6/4 and 14/11 GHz signals on satellite to Earth paths*. Final report to INTELSAT under contract INTEL-349, School of Electrical and Electronic Engineering, University of Bradford, Bradford, West Yorkshire, BD7 1DP, Inglaterra.
- MCEWAN, N.J., CONNOLLY, C., EXCELL, D. y BASHIR, S.O. [1986] Attenuation, cross-polarization, and refraction in dust storms. Paper VIII-3, URSI Commission F Open Symposium, University of New Hampshire, Durham NH, EE.UU.
- MILLER, A. y ANTHES, R.A. [1981] *Meteorology*, Charles E. Merrill Publishing Co., 4th. Edn.
- MIMIS, V. y SMALLEY, A. [1982] Low elevation angle site diversity satellite communications for the Canadian Arctic, *IEEE Int. Conf. on Communications*, 4A.4.1-4A.4.5.
- MISME, P. y WALDTEUFEL, P. [1980] Calcul des affaiblissements par les précipitations sur un trajet Terre-satellite. *Proc. URSI (Commission F) International Symposium on Effects of the lower atmosphere on radio propagation at frequencies above 1 GHz*, Lennoxville, Canadá.
- MISME, P. y WALDTEUFEL, P. [1982] Affaiblissement calculés pour des liaison Terre-satellite en France, *Ann. Telecommun.*, Vol. 37, 325-333.

- MORITA, K. y HIGUTI, I. [1978] Statistical studies on rain attenuation and site diversity effect on Earth to satellite links in microwave and millimeter wavebands. *Trans. Inst. Electron. Comm. Engrs. Japan*, E61, 425-432.
- OLSEN, R.L., ROGERS, D.V. y HODGE, D.B. [1978] The aR^b relation in the calculation of rain attenuation. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 26, 2, 318-329.
- ORTGIES y otros [1992] *Proceedings of the NAPEX VI and ACTS miniworkshop*, 142-154.
- ORTGIES, G., DINTELMANN, F. y RÜCKER, F., [1991] Aspects of attenuation frequency scaling, *North American Radio Science Meeting and International IEEE/AP Symposium*, London, Canadá.
- OTSU, Y., KOBAYASHI, T., SHINOZUKO, T., IHARA, T. y AOYAMA, S. [1978] Measurement of rain attenuation at 35 GHz along the slant paths over two sites with a height difference of 3 km, *J. Radio Research Labs. (Japón)*, Vol. 25, 1-21.
- PARABONI, A. y RIVA, C. [1994] A New Method for the Prediction of Fade Duration Statistics in Satellite Links Above 10 GHz, *Intl. Jnl. Satellite Comm.*, Vol. 12, 387-394.
- PRATT, T, STUTZMAN, W.L., SAFAAI-JAZI, A., REMAKLUS, P.W., LASTER, J., NELSON, B. y AJAZ, H. [1993] Fade duration statistics from the Virginia Tech propagation experiment using the Olympus satellite 12, 20 and 30 GHz beacons. *Proceedings of OPEX XX*, 224-256, Darmstadt, Alemania.
- ROGERS, D.V. [1981] Diversity and single-site radiometric measurements of 12 GHz rain attenuation in different climates, *IEE Conf. Publ. 195*, 118-123.
- ROGERS, D.V. y ALLNUTT, J.E. [1984] Evaluation of a site diversity model for satellite communications systems, *IEEE Proc. F*, Vol. 131, 501-506.
- ROGERS, R.R. [1976] Statistical rainstorm models: their theoretical and physical foundations, *IEEE Trans.*, Vol. AP-24, 547-566.
- RUCKER, F. [1980] Simultaneous propagation measurements in the 12 GHz band on the SIRIO and OTS satellite links, *URSI Commission F Open Symposium*, Lennoxville, PQ, Canadá, 4.1.1-4.2.5.
- RUE, O. [1985] Influence of the atmosphere on Earth-to-satellite links at frequencies above 10 GHz, *TELE*, Vol. 2, (Edición en inglés, Suecia).
- RUE, O. [1988] The statistical dependence of rain height on rain rate, and its use in rain attenuation prediction. *Swedish Telecom Radio Report R1 01/88*.
- STRICKLAND, J.I. [1977] Radiometric measurement of site diversity improvement at two Canadian locations, *URSI Commission F Open Symposium*, La Baule, Francia (documento tardío).
- SZUPPA, S., HEYER, G. y TROMMER, H. [1993] Vergleich einjähriger 30-GHz-Radiometermessungen mit gleichzeitigen Regenintensitätsmessungen für den Großraum Berlin, *Kleinheubacher Berichte* 36, 701-705.
- TOWNER, G.C., BOSTIAN, C.W., STUTZMAN, W.L. y PRATT, T. [1984] Instantaneous diversity gain in 10-30 GHz satellite systems, *IEEE Trans.*, Vol. AP-32, 206-208.

- TOWNER, G.C., MARSHALL, R.E., STUTZMAN, W.L., BOSTIAN, C.W., PRATT, T., MANUS, E.A. y WILEY, P.H. [1982] Initial results from the VPI&SU SIRIO diversity experiment, *Radio Science*, Vol. 17, 1489-1494.
- V HUGO, D. y WILDE, A. [1994] An adaptive resource sharing strategy for TDMA, *International Journal of Satellite Communications*, Vol. 12, 249-256.
- VOGEL, W.J., TORRENCE, G.W. y ALLNUTT, J.E. [1993] Rain Fades on Low Elevation Angle Earth-Satellite Paths: Comparative Assessment of the Austin, Texas, 11.2 GHz Experiment, *Proc. IEEE*, Vol. 81, 885-896.
- WALLACE, R.G. y CARR, J.R. [1982] Site diversity system operation study - Final Report, *Tech. Report 2130*, ORI Inc., Silver Spring, Maryland, EE.UU.
- WARREN, S.G. y otros [1986] Global distribution of total cloud cover and cloud type amounts over land, National Center for Atmospheric Research (NCAR) Technical Notes, *NCAR/TN-273*, Octubre.
- WILSON, R.W. y MAMMEL, W.L. [1973] Results from a three-radiometer path-diversity experiment, *IEE Conf. Publ.* 98, 23-27.
- WITTERNIGG, N., RANDEU, W.L., RIEDLER, W. y KUBISTA, E. [1987] 3-years analysis report (1980-1983), Final Report of INTELSAT contract IS-900: 12 GHz quadruple-site radiometer diversity experiment, Institut für Angewandte Systemtechnik in der Forschungsgesellschaft, Inffeldgasse 12, A-8010 Graz, Austria.
- WITTERNIGG, N., RANDEU, W.L., RIEDLER, W., KUBISTA, E., ARBESSER-RASTBURG, B. y ALLNUTT, J.E. [1993] Quadruple site diversity in Austria using 12 GHz radiometers, *IEE Proceedings-H*.
- YAMADA, M., KARASAWA, Y., YASUNAGA, M. y ARBESSER-RASTBURG, B. [1987] An improved prediction method for rain attenuation in satellite communications operating at 10-20 GHz. *Radio Science*, Vol. 22, 1053-1062.
- ZAKHARYAN, M.V., KORNILOV, L.N. y POZHIDAEV, V.N. [1989] Izmereniya raspredelenii dozhdevykh kapel po razmeram i otsenka koeffitsientov oslableniya radiovoln. (Medición de la distribución del tamaño de las gotas de lluvia y evaluación del coeficiente de atenuación). *Radiotekhnika i elektronika*, 8.

CAPÍTULO 4

CONTRIBUCIONES DE LA TEMPERATURA DE RUIDO CELESTE

El ruido radioeléctrico que emite toda la materia, si bien se utiliza como fuente de información en radioastronomía y teledetección, puede ser un factor limitativo para los servicios de comunicaciones. Las fuentes de ruido radioeléctrico de interés en los trayectos Tierra-espacio son la atmósfera, las nubes, la lluvia, las fuentes extraterrestres y el ruido procedente de la superficie de la Tierra. En la Recomendación UIT-R P.372 figuran los métodos de predicción al respecto. En [Kraus, 1966] aparece información fundamental sobre ruido radioeléctrico y fuentes galácticas.

4.1 Efectos de la temperatura de ruido atmosférico en los trayectos Tierra-espacio

La temperatura de ruido de una antena de satélite viene determinada por la elevada temperatura emitida por la Tierra, que ocupa en su totalidad, o casi, el haz principal de la antena. El ruido adicional procedente de la precipitación u otras variables es insignificante en este caso [Allnutt, 1989]. Para un haz mundial, la temperatura de ruido depende tanto de la frecuencia como de la posición del satélite con respecto a las masas de tierra principales de la Tierra. La figura 9 de la Recomendación UIT-R P.372 muestra esta dependencia.

Sin embargo, una antena situada en la superficie observa un cielo relativamente frío y, por consiguiente, la presencia de nubes y lluvia puede elevar de manera significativa la temperatura de ruido de la antena. Por regla general, la temperatura observada por una antena viene dada por la ecuación:

$$T_s = T_m(1 - 10^{-A/10}) + T_g \times 10^{-A/10} \quad \text{K} \quad (4.1)$$

siendo T_s la temperatura de ruido celeste vista por la antena, T_m la temperatura eficaz del medio de atenuación (atmósfera, nubes, lluvia), A la atenuación total debida al medio y T_g la temperatura de todas las fuentes radioeléctricas extraterrestres más el ruido galáctico de fondo (aproximadamente 3 K por encima de 3 GHz). (La justificación de esta ecuación figura en los puntos 3-15 y 3-16 de [Fraus, 1966].) En la mayoría de los casos de los sistemas de satélite prácticos, puede ignorarse el término relativo al ruido extraterrestre (a menos que el Sol o la Luna se encuentren en el haz de la antena) y puede aplicarse en ese caso la ecuación (52) de la Recomendación UIT-R P.618.

El efecto de la lluvia en un enlace descendente de satélite no se limita a la atenuación sino que además provoca una disminución de la relación C/N debido a la mayor temperatura de ruido que aparece en condiciones de lluvia en comparación con las condiciones de cielo despejado. En algunos casos el aumento de la temperatura de ruido tiene más influencia sobre el enlace que la propia atenuación [Pratt y Bostian, 1986].

4.2 Ruido galáctico y otras fuentes de ruido extraterrestre

Es bien conocido el ruido procedente de fuentes extraterrestres, especialmente el Sol, la Luna y el fondo galáctico, y sus efectos sobre la temperatura de ruido total de un sistema pueden calcularse utilizando el método del punto 6 de la Recomendación UIT-R P.372. La temperatura de brillo

del Sol disminuye al aumentar la frecuencia, desde aproximadamente 10^6 a 30 MHz hasta 10^4 a 10 GHz en condiciones en calma. A 20 GHz una antena de 2 m de diámetro (anchura de haz de unos $0,5^\circ$) experimentaría un incremento de la temperatura de ruido de aproximadamente 8 100 K con el Sol en calma [Ippolito, 1989]. El Sol y la Luna subtienden cada uno de ellos un ángulo de unos $0,5^\circ$ de manera que si el haz de la antena es notablemente superior a ese valor, el efecto del Sol o la Luna se promedia con una parte más amplia de cielo relativamente frío.

4.3 Ruido procedente de la superficie de la Tierra y de fuentes artificiales

Las antenas de estaciones terrenas fijas dirigidas hacia satélites que se encuentran en la órbita de los satélites geoestacionarios están diseñadas y emplazadas normalmente de forma que el lóbulo principal no se vea interceptado por el terreno local u obstrucciones tales como montañas o edificios de gran tamaño. Los lóbulos laterales también se minimizan para reducir el efecto de la temperatura de la Tierra sobre la calidad de funcionamiento del sistema. Sin embargo, los sistemas móviles terrestres por satélite, el haz de antena puede atravesar zonas de vegetación o sufrir la obstrucción de edificios o del terreno. Algunas mediciones efectuadas [Estabrook y otros, 1990] sugieren que la influencia del ruido adicional es más acusada cuando la antena presenta un bajo valor de la temperatura de ruido interna, es decir en el caso de antenas menos directivas. Aunque estas obstrucciones aumentarán la temperatura de ruido observada por la antena, también provocarán apantallamiento o efectos multitrayecto que probablemente tendrán más repercusión en la calidad de funcionamiento total del enlace; véase el Capítulo 8.

El ruido artificial es el efecto dominante en las frecuencias de las bandas de ondas métricas y decimétricas en todos los lugares salvo en las zonas rurales más tranquilas. A diferencia de otros efectos del ruido, existe una dependencia con la polarización en el sentido de que la componente vertical es superior a la horizontal [Hall, 1979]. Por regla general, el nivel mediano del ruido disminuye linealmente con $\log(f)$. Existen variaciones significativas con el emplazamiento y la hora, y hasta la fecha se dispone de pocos datos para elaborar modelos con los que puedan predecirse los niveles.

4.4 Ejemplo de resolución de un problema

En un enlace descendente a 20 GHz, la atenuación rebasada durante el 0,01% del tiempo es 7 dB. Si la temperatura de la lluvia es 260 K y se ignora el ruido galáctico, la temperatura de ruido celeste observada por la antena es, a partir de la ecuación (4.1):

$$T_s = 260(1 - 10^{-7/10}) = 208 \text{ K}$$

Si la temperatura de ruido del sistema receptor T_r en el cielo despejado es 250 K, el incremento de la temperatura de ruido es:

$$10\log\left(\frac{T_s + T_r}{T_r}\right) = 10\log\left(\frac{208 + 250}{250}\right) = 2,6 \text{ dB}$$

por consiguiente, el margen que debe presentar el sistema para tener en cuenta tanto la atenuación como el incremento de ruido es de 9,6 dB.

REFERENCIAS PARA EL CAPÍTULO 4

- ALLNUTT, J.E. [1989] *Satellite-to-ground radiowave propagation*, Peter Peregrinus Press, IEE, Londres.
- ESTABROOK, P., OLIVER, G., JAMNEJAD, V., HUANG, J. y THOMAS, B. [1990] The impact of external noise sources on antenna noise temperature and the characterization of the antennas used in the joint MSAT-X/AUSSAT experiment, *MSAT-X Quarterly*, No. 22, JPL 410-13-22.
- HALL, M.P.M. [1979] *Effects of the Troposphere on Radio Communication*, Peter Peregrinus Press, IEE, Londres.
- Ippolito, L.J [1989] Propagation effects handbook for satellite systems design, *NASA Ref. Publ.* 1082(04), NASA, Washington, DC, EE.UU.
- KRAUS, J.D. [1966] *Radio Astronomy*, McGraw-Hill Book Co., Nueva York, NY, EE.UU.
- PRATT, T. y BOSTIAN, C.W. [1986] *Satellite Communications*, John Wiley and Sons, Nueva York, EE.UU.

CAPÍTULO 5

DESPOLARIZACIÓN EN EL TRAYECTO

5.1 Introducción

En algunos sistemas de comunicaciones por satélite se utilizan señales de polarización ortogonal doble para aumentar la capacidad del canal sin incrementar los requisitos de anchura de banda. Esta técnica se conoce con el nombre "reutilización de frecuencia". Sin embargo, la interferencia entre canales debido a la despolarización de la onda en el trayecto de propagación puede limitar la calidad de funcionamiento ideal que el sistema puede alcanzar.

La despolarización modifica las propiedades de polarización de la onda incidente. Las polarizaciones lineal y circular se transforman en una polarización elíptica y los propios ejes de polarización pueden experimentar una rotación [Chu, 1971; DiFonzo y otros, 1976].

Los aspectos radiometeorológicos de la despolarización se consideran en el Capítulo 3 del Manual del UIT-R sobre Radiometeorología. Existen textos excelentes relativos a los aspectos de despolarización del sistema (por ejemplo, [Allnutt, 1989]).

5.1.1 Causas físicas de la despolarización

La despolarización (polarización cruzada) puede aparecer cuando las ondas se propagan a través de medios anisótropos (asimétricos) respecto a la polarización incidente. La despolarización en forma de rotación de Faraday del plano de la polarización lineal surge en la ionosfera debido a que ésta es birrefringente en presencia del campo magnético de la Tierra. Las degradaciones resultantes se evitan normalmente empleando polarización circular en aquellas frecuencias (inferiores a unos 10 GHz) para las cuales el efecto puede ser significativo. En el Capítulo 7 se examinan con detalle los efectos de la propagación ionosférica.

La despolarización por la precipitación viene causada por los desplazamientos diferenciales de fase y atenuación que son inducidos entre los componentes ortogonales de una onda incidente por los hidrometeoros anisótropos. Las ondas con polarización ortogonal que se propagan en un medio que provoca únicamente desplazamientos diferenciales de fase están despolarizadas, pero mantienen el carácter ortogonal; sin embargo, si el medio provoca asimismo una atenuación diferencial, las ondas también pierden la ortogonalidad [DiFonzo y otros, 1976].

5.1.2 Importancia de la despolarización en los sistemas

La importancia de la despolarización en los sistemas de telecomunicaciones depende de varios factores:

- frecuencia de la señal, f ;
- geometría del trayecto (por ejemplo, ángulo de elevación θ y ángulo de inclinación τ de la polarización recibida);
- factores climáticos locales (por ejemplo, intensidad del clima lluvioso); y
- sensibilidad a la interferencia de polarización cruzada (por ejemplo, posibilidad de que el sistema emplee la reutilización de frecuencias).

En los sistemas que funcionan con un solo estado de polarización, la despolarización produce un pequeño incremento aparente de la atenuación en el trayecto. Sin embargo, en los sistemas que utilizan polarizaciones ortogonales dobles para aumentar la capacidad del canal, la señal deseada recibida en uno u otro canal a veces estará contaminada por la interferencia procedente de un componente de polarización cruzada. Se produce una interferencia análoga en los satélites de colocalización cercana, que utilizan las polarizaciones ortogonales para aumentar el aislamiento entre los sistemas.

En ciertos casos, el aislamiento del canal puede producir una degradación suficiente para alterar la calidad de funcionamiento, debiéndose tener en cuenta en el diseño de sistemas con reutilización de frecuencias. La despolarización es con frecuencia la degradación más significativa del trayecto en los sistemas de satélite en 6/4 GHz [Allnutt, 1984] y puede ser el factor limitante de la calidad de funcionamiento en algunos trayectos de satélites en 14/11 GHz, en particular en ángulos de elevación de trayecto bajos en climas de pluviosidad moderada [Rogers y Allnutt, 1986]. (Este caso se ilustra en los cálculos del ejemplo del punto 5.6.) Para frecuencias de 20 GHz y superiores, la calidad de funcionamiento está en general limitada por el desvanecimiento en el trayecto, por lo menos para márgenes de desvanecimiento de hasta 10 - 15 dB y un margen de discriminación por polarización cruzada operacional mínimo de 15 dB.

Las técnicas digitales y de mitigación de la degradación adaptativa tienden a beneficiar la calidad de funcionamiento del sistema en un entorno de reutilización de frecuencias. Es una excepción el control de la potencia en el enlace ascendente, pues los grandes aumentos de la potencia transmisora pueden producir una interferencia notable en los enlaces adyacentes [McEwan y Leitao, 1982].

5.1.3 Aislamiento y discriminación por polarización cruzada

La cantidad de polarización que interesa en un sistema de telecomunicación con reutilización de frecuencias es el aislamiento por polarización cruzada ("cross-polar isolation": XPI), definida como la relación en decibelios de la potencia copolar (deseada) recibida en un canal y la potencia de polarización cruzada (no deseada) recibida en ese mismo canal. En la práctica es difícil medir el XPI, porque la componente de polarización cruzada no se puede diferenciar del ruido en el canal copolar. La magnitud medida habitualmente en los experimentos es la discriminación por polarización cruzada ("cross-polar discrimination": XPD), definida como la relación entre la potencia copolar recibida en un canal y la potencia de polarización cruzada detectada en el canal ortogonal, procedentes ambas de la misma señal transmitida.

Las consideraciones teóricas prevén que la XPD y el XPI son equivalentes en la mayoría de las situaciones prácticas, y han confirmado esta conclusión las mediciones en el trayecto oblicuo realizadas con polarizaciones conmutadas [Cox y Arnold, 1984]. Por consiguiente, la ulterior exposición está hecha fundamentalmente en función de la cantidad medida, XPD.

5.1.4 Estados de la polarización

Toda onda electromagnética se caracteriza por un estado de polarización especificado en términos del vector de campo eléctrico. En el caso general, a medida que la onda progresa en el tiempo, el vértice del vector eléctrico traza una elipse en un plano perpendicular al de la dirección de propagación. En la figura 5.1 aparece una elipse de polarización representativa.

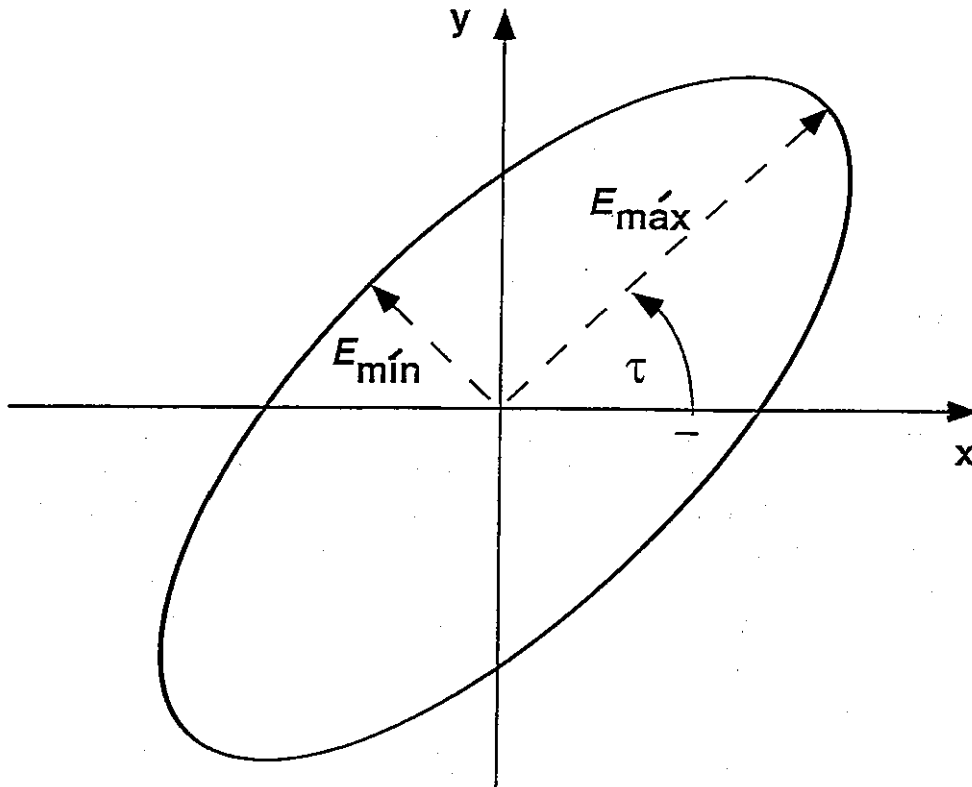


FIGURA 5.1

Elipse de polarización de una onda radioeléctrica con polarización elíptica representativa

El estado de polarización de una onda viene completamente definido por su elipse de polarización (es decir, las amplitudes del semieje mayor, $E_{máx}$, y el semieje menor, $E_{mín}$) y por el sentido de rotación del vector (definido como dextrógiro si la rotación en el sentido de las agujas del reloj a medida que la onda se aleja del observador y levógiro si la rotación en el sentido contrario al de las agujas del reloj). Como se ve en la figura 5.1, la elipse de polarización puede presentar una inclinación de un ángulo τ con respecto a un sistema de coordenadas particular (por ejemplo, definido por la horizontal y vertical locales en una estación terrena terminal). De hecho, la onda procedente de un satélite observada por una estación terrena casi siempre se encuentra inclinada con relación al horizonte local en la superficie [véase la ecuación (5.8)].

Existen dos importantes casos particulares del estado de polarización:

- si $E_{máx}$ y $E_{mín}$ son iguales en magnitud, el estado de polarización es *circular* (dextrógiro o levógiro, dependiendo del sentido de rotación); y
- si $E_{máx}$ no es nulo y $E_{mín}$ es cero, el vector eléctrico mantiene una orientación constante definida por $E_{máx}$ y el estado de polarización es *lineal*.

Con antenas reales es difícil generar estados de polarización puros y en la práctica las polarizaciones verdaderamente circulares y lineales rara vez de alcanzan. Una medida útil de la pureza de la polarización es la relación axial de tensiones, ar , definida de la forma siguiente:

$$ar = \left| \frac{E_{máx}}{E_{mín}} \right| \tag{5.1a}$$

o, en decibelios,

$$AR = 20 \log \left| \frac{E_{m\acute{a}x}}{E_{m\acute{i}n}} \right| \text{ dB} \quad (5.1b)$$

En la práctica, las ondas con relaciones axiales inferiores a aproximadamente 1,4 (es decir 3 dB) se considera normalmente que tienen una polarizaci3n "circular" y las que tienen relaciones axiales superiores a aproximadamente 10 (es decir, 20 dB) se clasifican como de polarizaci3n "lineal".

5.1.5 Ortogonalidad y desadaptaci3n de la polarizaci3n

El funcionamiento adecuado en entornos con reutilizaci3n de frecuencias exige que el acoplamiento (diafonía) entre ambas polarizaciones se limite a un nivel mínimo durante un determinado porcentaje de tiempo. De forma equivalente, el aislamiento de polarizaci3n entre las dos señales debe ser superior a un cierto umbral mínimo determinado por las normas de calidad de funcionamiento. Este aislamiento entre los dos estados de polarizaci3n es proporcional al grado de ortogonalidad entre dichos estados y el acoplamiento entre una antena y una onda incidente es proporcional al grado de identidad que presenten los estados de polarizaci3n. Toda reducci3n del acoplamiento se denomina desadaptaci3n de polarizaci3n.

Puede demostrarse te3ricamente [Beckman, 1968] que dos polarizaciones son ortogonales cuando sus elipses de polarizaci3n tienen la misma relaci3n axial, sus ejes principales son mutuamente perpendiculares y los sentidos de rotaci3n son opuestos. En los sistemas reales pocas veces se alcanzan las condiciones ideales pero esta definici3n permite analizar el acoplamiento de una onda con una antena o la diafonía entre señales con polarizaci3n doble en un sistema con reutilizaci3n de frecuencias.

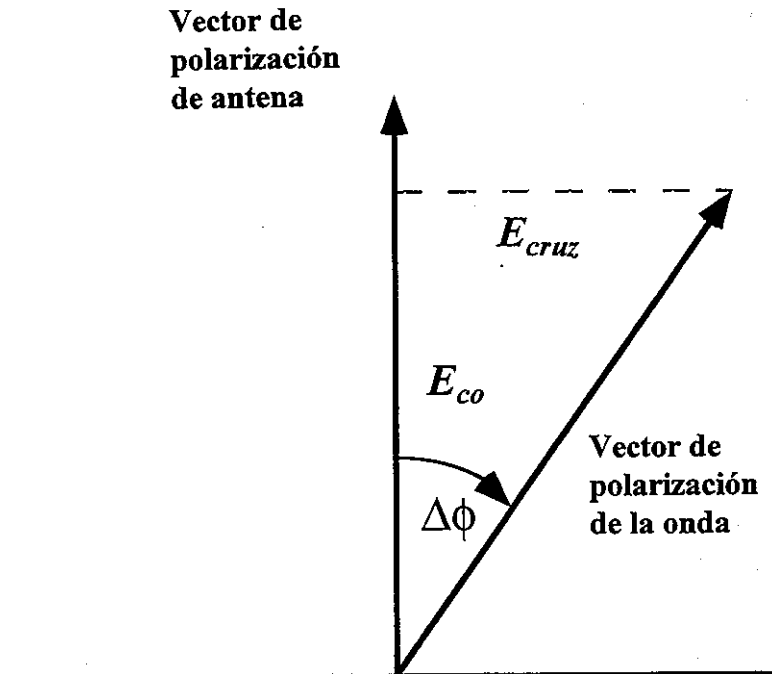


FIGURA 5.2

Relaci3n entre la antena con polarizaci3n lineal y la onda con polarizaci3n lineal girada un ángulo con respecto a la polarizaci3n de la antena

Por ejemplo, considérese la señal con polarización lineal radiada por un dipolo elemental. Para detectar esta señal, normalmente se utiliza una antena caracterizada por el mismo estado de polarización (lineal). Supóngase, sin embargo, que la polarización de la onda ha sido girada por el medio de propagación un ángulo $\Delta\phi$ con respecto a la polarización de la antena, como se representa en la figura 5.2. En este caso la relación (tensión) de los componentes de polarización de la onda con respecto a la polarización de la antena es simplemente

$$\left| \frac{E_{cruz}}{E_{co}} \right| = \text{tg}(\Delta\phi) \quad (5.2a)$$

Siendo $\Delta\phi$ el ángulo entre los vectores de polarización de la onda incidente y la antena de recepción. El cuadrado de la relación de tensiones proporciona la relación de potencias conocida con el nombre de relación de polarización cruzada (*cpr*):

$$cpr = \left| \frac{E_{cruz}}{E_{co}} \right|^2 = \text{tg}^2(\Delta\phi) \quad (5.2b)$$

que en decibelios se expresa como:

$$CPR = 20 \log(\text{tg} \Delta\phi) \quad \text{dB} \quad (5.2c)$$

La CPR cuantifica la diafonía generada en una antena cuando los ejes de polarización de la antena y de la onda incidente presentan un ángulo de separación de $\Delta\phi$.

La relación de polarización cruzada CPR es la inversa del aislamiento por polarización cruzada, XPI, como se define en el punto 5.1.3. Esta correspondencia se aplica en el citado punto para especificar la degradación en el aislamiento de la señal causada por la desadaptación de la polarización de la onda y de la antena cuando una onda con polarización lineal resulta girada por la ionosfera (rotación Faraday).

5.2 Relación entre la despolarización y la atenuación

Se dispone de métodos para calcular los parámetros de dispersión de las partículas de precipitación representativas [Oguchi, 1983], que pueden utilizarse como datos de entrada para los modelos que establecen una relación entre la despolarización y la atenuación en un trayecto de propagación, al menos para el medio de lluvia [Nowland y otros, 1977]. Esos modelos han resultado de gran utilidad para predecir las degradaciones del sistema. Si bien no pueden explicar otros efectos de la despolarización tales como los causados por los cristales de hielo que producen una débil atenuación, tales efectos pueden ser normalmente contemplados de forma aproximada introduciendo un factor de corrección empírico.

La atenuación en el trayecto depende de la pérdida global en el medio de propagación, mientras que la despolarización depende principalmente de la asimetría global del medio [Rogers, 1985]. Por consiguiente, la correlación instantánea entre la XPD y la atenuación en un trayecto es a menudo escasa [Ippolito, 1981], pero los experimentos permiten afirmar que la correlación es adecuada sobre una base estadística, al menos para la parte de la distribución dominada por la precipitación que provoca atenuación (lluvia). Con un modelo idóneo, pueden, pues, calcularse estadísticas de la XPD a partir de las estadísticas de la atenuación causada por la lluvia medidas o previstas.

La forma general de las expresiones semiempíricas que relacionan la XPD (dB) con la atenuación copolarizada, A_p (dB), rebasada durante el porcentaje p del tiempo en el mismo trayecto, es [Nowland y otros, 1977]:

$$XPD = U - V \log(A_p) \quad (\text{dB}) \quad (5.3)$$

Se han propuesto varias expresiones de este tipo [Olsen y Nowland, 1978; Dissanayake y otros, 1980; Chu, 1982; Stutzman y Runyon, 1984; Fukuchi y otros, 1984] para las aplicaciones de sistemas de telecomunicaciones. El método de la Recomendación UIT-R P.618 sigue este mismo formalismo.

5.2.1 Cálculo de las estadísticas de la XPD a largo plazo

El modelo de la XPD recomendado en el punto 4.1 de la Recomendación UIT-R P.618 se considera válido para las frecuencias, f , comprendidas en la gama de $8 \text{ GHz} \leq f \leq 35 \text{ GHz}$, con ángulos de elevación del trayecto $\theta \leq 60^\circ$. (Conviene señalar, no obstante, que el procedimiento de predicción de la atenuación que figura en la Recomendación UIT-R P.618 se recomienda sólo para frecuencias de hasta 30 GHz.) Más adelante, en el punto 5.6, se facilita un ejemplo de cálculo de la XPD utilizando el método.

El método de predicción del UIT-R se ha desarrollado a partir de la forma general de la anterior ecuación (5.3). Se han obtenido términos adicionales para tener en cuenta explícitamente la dependencia de XPD respecto a la frecuencia, el ángulo de elevación del trayecto, el estado de polarización de la onda y la despolarización por cristales de hielo.

5.2.1.1 Despolarización por el hielo

La despolarización debida a los cristales de hielo aparece frecuentemente por encima de la región de la lluvia en las tormentas y a veces en nubes sin lluvia. El método de predicción del UIT-R incorpora un tipo de corrección empírica para estimar el valor estadístico de la componente de XPD generada por las partículas de hielo.

Combinando las expresiones para la despolarización por la lluvia y el hielo de la Recomendación UIT-R P.618, la expresión equivalente para la despolarización neta en el trayecto puede escribirse de la forma siguiente:

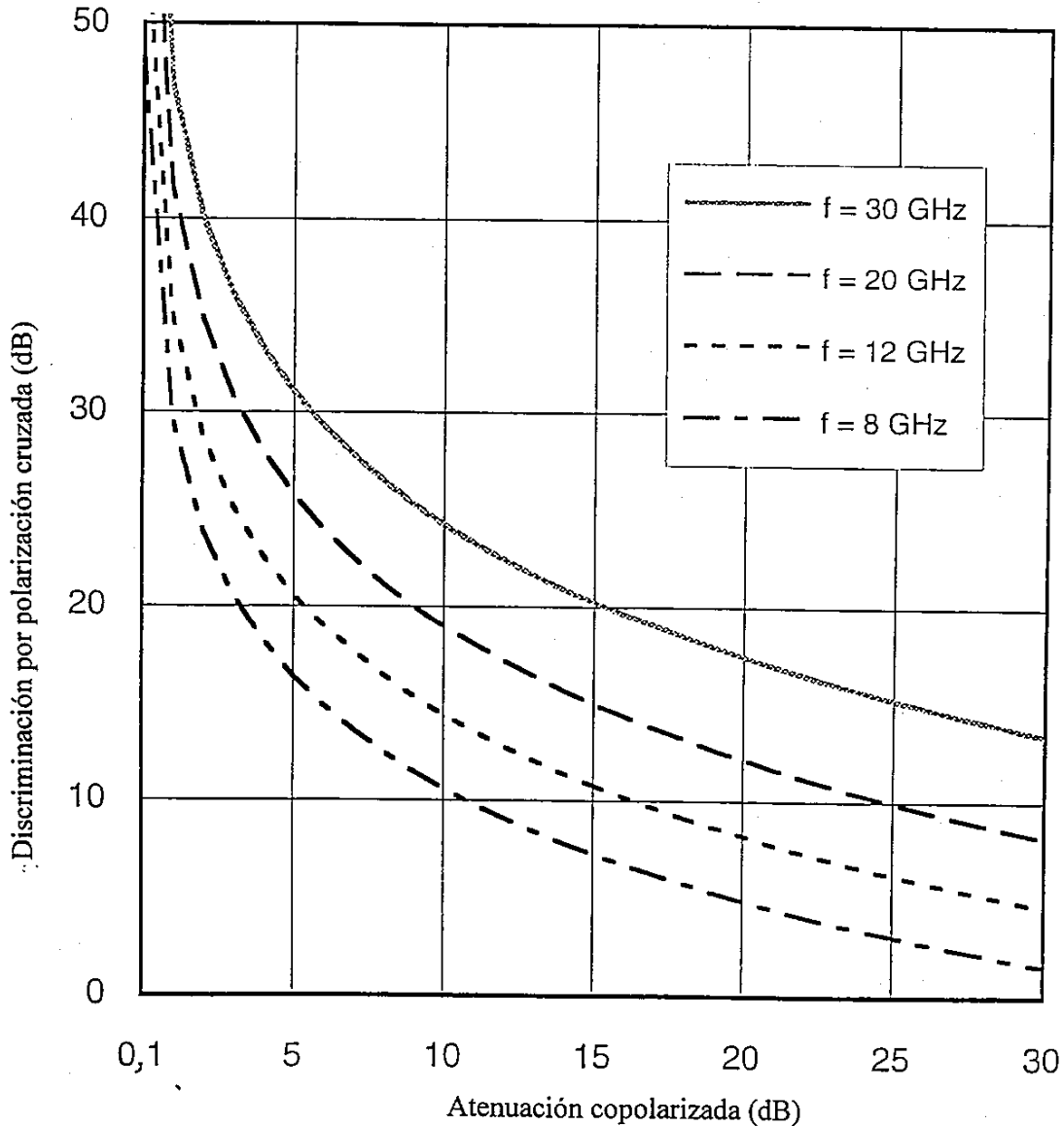
$$XPD_p = XPD_{lluvia} [0,85 - 0,05 \log p] \text{ dB} \quad (5.4)$$

donde el término entre corchetes corresponde a los efectos de la desvalorización por el hielo. La ecuación (5.4) demuestra que en el modelo, la contribución del hielo a la XPD neta en el trayecto disminuye al reducirse el porcentaje de tiempo.

Para porcentajes de tiempo p de 1,0; 0,1; 0,01 y 0,001%, el factor entre corchetes adquiere los valores respectivos de 0,85; 0,90; 0,95 y 1,0. Por consiguiente, en un porcentaje de tiempo del 1%, la XPD_p neta (en dB) después de tener en cuenta la despolarización por el hielo es el 85% de la XPD_{lluvia} (por ejemplo, si la XPD_{lluvia} no rebasa los 30 dB durante el 1% del tiempo, la correspondiente XPD_p se degrada a 25,5 dB después de tener en cuenta los efectos del hielo). Sin embargo, para un porcentaje de tiempo del 0,001%, no se aplica ningún ajuste para la despolarización por el hielo.

5.2.1.2 Dependencia respecto a la frecuencia

En la figura 5.3 se representa la relación entre la despolarización por lluvia y la atenuación por lluvia obtenida por el método del punto 4.1 de la Recomendación UIT-R P.618 para frecuencias de 8, 12, 20 y 30 GHz, suponiendo polarización circular ($\tau = 45^\circ$) y un ángulo de elevación de 30° (ignorando el término relativo al pequeño ángulo de inclinación). La XPD_{lluvia} (y en consecuencia la XPD_p) correspondiente a un valor fijo de A_p disminuye (empeora) al hacerlo en la frecuencia. A la inversa, en la gama del modelo, A_p aumenta (se hace peor) a medida que lo hace la frecuencia. Por consiguiente, la determinación de la importancia relativa de la atenuación y la despolarización en un sistema de telecomunicaciones con reutilización de frecuencias exige realizar una estimación de ambas cantidades.



Ángulo de elevación = 30°

Ángulo de inclinación de la polarización = 45°

FIGURA 5.3

XPD debida a la lluvia en función de la atenuación debida a la lluvia copolar mostrando la dependencia con la frecuencia

En las bandas de frecuencias de 6/4 GHz, sin embargo, la atenuación en el trayecto es baja y las estimaciones de atenuación debida a la lluvia no son muy útiles para predecir los valores estadísticos de la XPD. En estas bandas, donde la despolarización puede ser muy importante, puede utilizarse el método de relación con la frecuencia indicado en el punto 4.3 de la Recomendación UIT-R P.618 con las estimaciones de la atenuación para una frecuencia más elevada (por ejemplo, 8 GHz) o con las estadísticas de la atenuación medida para una frecuencia superior, si está disponible, a fin de estimar la polarización cruzada.

Para determinar los valores estadísticos de la XPD en frecuencias inferiores a 8 GHz, también es posible utilizar las relaciones entre la XPD, la intensidad de lluvia en un punto y la longitud efectiva del trayecto [Oguchi, 1977; Kobayashi, 1977]. Olsen y Nowland [1978] han propuesto una técnica sencilla para predecir la distribución acumulativa global de la XPD con este enfoque.

La XPD correspondiente a un valor fijo de atenuación aumenta con la frecuencia, de forma que la XPD prevista para una frecuencia y configuración del sistema determinados suele dar lugar a una estimación de los valores más bien conservadora para frecuencias más elevadas. Por ejemplo, una estimación de la XPD para el límite superior de la frecuencia de 35 GHz en el modelo UIT-R representa una estimación conservadora para frecuencias superiores a 35 GHz.

5.2.1.3 Dependencia respecto al porcentaje de tiempo

En el método de predicción de la XPD tres términos dependen del porcentaje de tiempo. El más importante de ellos es la relación entre la XPD_p y la atenuación copolar A_p . Los valores necesarios de A_p se obtienen a partir de los valores estadísticos acumulativos medidos o previstos de la atenuación debida a la lluvia para el trayecto de propagación en cuestión. Como se ha indicado en el punto 5.2.1.1 el ajuste empírico aplicado al valor estimado de la XPD_{lluvia} para tener en cuenta la despolarización por hielo también depende del porcentaje de tiempo.

El otro término explícitamente dependiente del porcentaje de tiempo es el ángulo de inclinación, C_σ que viene dado por la expresión:

$$C_\sigma = 0,0052 \sigma^2 \quad \text{dB} \quad (5.5)$$

siendo σ la desviación típica eficaz (grados) de la distribución del ángulo de inclinación, con valores de 0°, 5°, 10° y 15° para los porcentajes de tiempo respectivos de 1,0; 0,1; 0,01 y 0,001%. Como resulta evidente por la figura 5.4, σ depende linealmente del logaritmo del porcentaje de tiempo en la gama de aplicación del modelo y puede aproximarse mediante la siguiente sencilla ecuación:

$$\sigma = -5 \log (p) \quad \text{grados} \quad (5.6)$$

Para obtener un formato más conveniente a efectos de cálculo informático, las ecuaciones (5.5) y (5.6) pueden combinarse en la siguiente:

$$C_\sigma = 0,13 (\log p)^2 \quad \text{dB} \quad (5.7)$$

para la gama $0,001 \leq p \leq 1,0$. La corrección resultante es pequeña y va desde cero, para $p = 1\%$, hasta 1,17 dB, para $p = 0,001\%$.

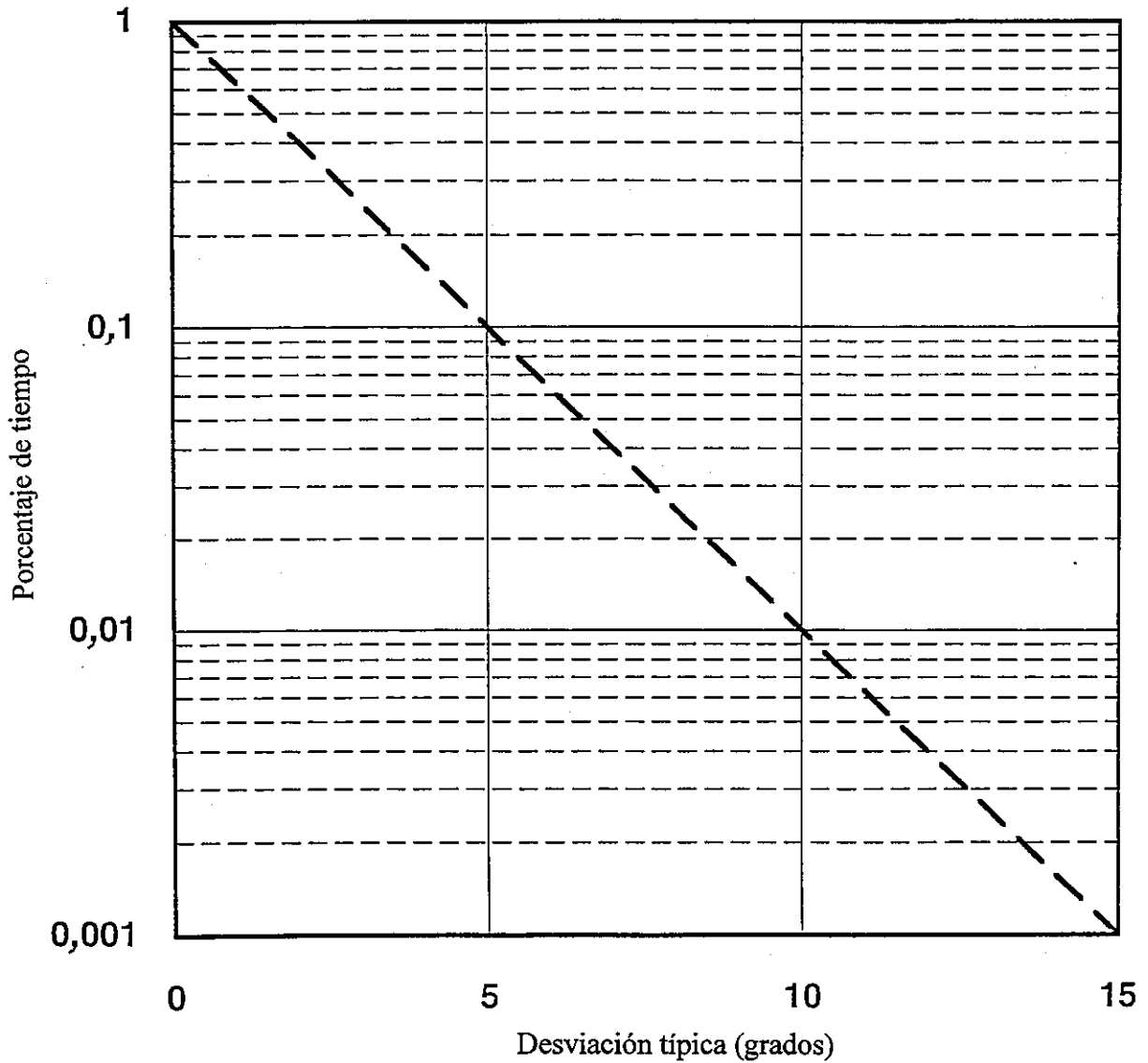


FIGURA 5.4

Relación entre la desviación típica de la distribución del ángulo de inclinación y el porcentaje de tiempo

5.2.2 Dependencia respecto a la configuración del trayecto

Por lo que respecta a la despolarización, la calidad de funcionamiento obtenible en un enlace de propagación no sólo depende de la geometría del trayecto sino también del tipo de polarización y, en el caso de polarización lineal y elíptica, del ángulo de inclinación de la polarización con respecto a la vertical local en la estación terrena. El ángulo de elevación del trayecto también influye en la simetría neta percibida por una onda durante la propagación con lluvia (máxima en un trayecto horizontal pero prácticamente nula en el cénit donde las gotas de lluvia parecen ser casi simétricas a la onda incidente). Como se indica en el punto 5.2, la XPD depende estadísticamente de la atenuación en el trayecto que, a su vez, depende fuertemente del ángulo de elevación del trayecto.

Como los hidrometeoros asimétricos tienden a caer con sus ejes mayores de simetría alineados, como término medio, con la vertical local [Cox, 1981], el ángulo de inclinación de la polarización lineal o elíptica es bastante importante.

Conociendo los emplazamientos del satélite y de la estación terrena, pueden calcularse los ángulos de elevación del trayecto y acimutal y la distancia al satélite utilizando métodos normalizados (por ejemplo, [Morgan y Gordon, 1989]). En el caso más general, el eje de puntería del haz del satélite corta a la Tierra en un punto (a' , b'), siendo a' la latitud y b' la diferencia entre la longitud del satélite y la longitud del punto de intersección. El ángulo de inclinación de la polarización, τ , de la polarización lineal o elíptica con respecto a la vertical en la estación terrena puede calcularse mediante la siguiente ecuación [Shkarofsky y Moody, 1976].

$$\tau = \arctg \frac{[\text{sen } a' \cdot \cos a \cdot \text{sen } b - \cos a' \cdot \text{sen } b' \cdot \text{sen } a]}{[\text{sen } a' \cdot \text{sen } a + \cos a' \cdot \text{sen } b' \cdot \cos a \cdot \text{sen } b]} \quad (5.8a)$$

siendo a la latitud de la estación terrena (positiva en el hemisferio Norte y negativa en el hemisferio Sur) y b la longitud del satélite menos la longitud de la estación terrena (en grados Este).

Sin embargo, si el eje de puntería del haz del satélite corta a la Tierra en la misma longitud que la longitud del satélite ($b' = 0$), la ecuación (5.8a) se reduce a:

$$\tau = \arctg (\text{sen } b / \text{tg } a) = 90^\circ - \arctg (\text{tg } a / \text{sen } b) \quad (5.8b)$$

con referencia a la vertical en la estación terrena, o

$$\tau = \arctg (\text{tg } a / \text{sen } b) \quad (5.8c)$$

con referencia a la horizontal en la estación terrena [Barton, 1975], que es la referencia más adecuada puesto que la horizontal local siempre es perpendicular al trayecto de propagación. Los cálculos anteriores suponen que el eje de polarización de un satélite es paralelo al ecuador. Sin embargo, si la polarización en el satélite sufre una rotación de un ángulo $\Delta\zeta$ con respecto a esta dirección de referencia, el valor de τ que aparece en la ecuación (5.8) simplemente se incrementa un valor de $\pm\Delta\zeta$ (dependiendo el signo del sentido de rotación de la polarización en el satélite).

Para una polarización circular, el ángulo de elevación τ se fija a un valor de 45° .

5.2.3 Evaluaciones de la calidad de funcionamiento del modelo

Las evaluaciones de los modelos de XPD utilizando los datos medidos [Yamada y Karasawa, 1990], confirman el buen rendimiento del método descrito en la Recomendación UIT-R P.618. También se han utilizado los resultados de tales pruebas para mejorar el modelo cuantificando los términos para el ángulo de inclinación de las gotas de lluvia y la despolarización por cristales de hielo en términos de porcentaje de tiempo.

5.2.4 Estadísticas conjuntas de la XPD y la atenuación

Si están disponibles, para el diseño de los sistemas es preferible utilizar las distribuciones de probabilidad acumulativa conjunta de la XPD y la atenuación, especialmente en los trayectos Tierra-espacio donde la variabilidad de la XPD del trayecto para un valor determinado de A_p (provocada principalmente por la despolarización por cristales de hielo) es elevada para atenuaciones próximas al margen de desvanecimiento del sistema. Sin embargo, cuando se aplica al cálculo de los márgenes de desvanecimiento en sistemas que utilizan polarización doble, el empleo de una relación de equiprobabilidad entre XPD_p y A_p para los cálculos de las interrupciones puede dar resultados similares a la utilización de probabilidades conjuntas [van Cappellen y otros, 1980].

La distribución de probabilidad condicional de XPD para un valor determinado de la atenuación puede modelarse suponiendo que la relación de tensiones entre la polarización cruzada y la polarización copolar, $r = 10^{-XPD/20}$, sigue una distribución normal. Los parámetros de la distribución son: el valor medio, r_m , que es muy cercano a $10^{-XPD_{lluvia}/20}$ donde XPD_{lluvia} se calcula con el método de la Recomendación UIT-R P.618; y la desviación típica, s_r , que supone la existencia de un valor casi constante de 0,038 para $3 \text{ dB} \leq A_p \leq 8 \text{ dB}$. Estos resultados de la distribución de la probabilidad condicional de XPD para un valor dado de la atenuación se basan en los estudios realizados con el satélite SIRIO [Mauri y otros, 1987].

5.2.5 Dependencia a largo plazo con la frecuencia y la polarización

En el punto 4.3 de la Recomendación UIT-R P.618 figura un método para extrapolar los valores estadísticos de la XPD medidos o previstos en una frecuencia concreta y con un ángulo de inclinación de la polarización determinado para otras frecuencias y otros ángulos de inclinación. Este método es particularmente útil para extrapolar los valores estadísticos de la XPD medidos a otras frecuencias y para ampliar los valores estadísticos previstos con el método del punto 4.1 hasta las bandas de 6/4 GHz.

5.3 Dependencia de XPD y XPI respecto a los procesos físicos

Pueden obtenerse expresiones para describir la dependencia de la despolarización en el trayecto con respecto a los mecanismos físicos (rotación del plano de polarización, atenuación diferencial y desplazamiento de fase diferencial) que provocan el efecto. Si bien no son tan útiles para las aplicaciones del sistema como las predicciones estadísticas descritas anteriormente, los resultados ayudan a comprender los procesos físicos que generan la despolarización en el trayecto.

5.3.1 Rotación de Faraday en la ionosfera

Como se indica en el punto 5.1.5, la degradación del aislamiento por polarización cruzada provocada por la rotación del plano de polarización lineal viene dada por la expresión

$$\Delta XPI = - 20 \log (\operatorname{tg} \Delta\phi) \quad \text{dB} \quad (5.9)$$

siendo $\Delta\phi$ la rotación neta. Para una transversal unidireccional de la ionosfera con un ángulo de elevación de 30° , la Recomendación UIT-R. P.531 proporciona una estimación de caso más desfavorable de $\Delta\phi = 108^\circ$ a 1 GHz. Las estimaciones para otras frecuencias pueden obtenerse aplicando el factor $1/f^2$, como se indica en el punto 7.3.1.

Basándose en estos datos, la rotación de Faraday rara vez rebasará 1° en las frecuencias de la banda 14/12 GHz (lo que corresponde a un XPI del trayecto de 35 dB, que es una degradación moderada) y será despreciable a 30/20 GHz. Sin embargo, a 6/4 GHz, $\Delta\phi$ puede tomar un valor de varios grados en regiones donde las degradaciones ionosféricas son intensas (es decir, cerca del ecuador magnético y en zonas aurales) y en frecuencias inferiores a unos 250 MHz puede rebasar varias rotaciones del plano de polarización.

Observados desde una estación terrena, los planos de polarización lineal giran en direcciones opuestas en los enlaces ascendente y descendente. Por consiguiente, no es posible compensar la rotación de Faraday girando el sistema de alimentación de la antena, si se utiliza la misma antena tanto para transmisión como para recepción. En varios casos pueden emplearse métodos de compensación que suponen la rotación del sistema de alimentación [Wolff, 1985]. Como ya se ha indicado, este efecto no se observa con la polarización circular.

5.3.2 Efectos de la precipitación

5.3.2.1 Atenuación diferencial

La rotación $\Delta\tau$ (grados) de un plano de polarización causada por la atenuación diferencial, ΔA (dB), entre componentes ortogonales del vector de polarización (por ejemplo, con respecto a los ejes de una gota de lluvia inclinada) puede expresarse de la forma siguiente [Lee, 1977].

$$\Delta\tau = |\phi - \tau| - \text{tg}^{-1} \left[(10^{-\Delta A/20})^{\pm 1} \text{tg} |\phi - \tau| \right] \quad \text{grados} \quad (5.10)$$

siendo ϕ el "ángulo de inclinación medio" del medio de despolarización (0° aproximadamente por término medio para fenómenos de lluvia y hielo [Cox, 1981]) y τ el ángulo de inclinación del vector de polarización incidente; el signo \pm es positivo para la polarización elíptica levógira y negativo para la polarización dextrógira. La ecuación (5.10) predice rotaciones desiguales para las polarizaciones dextrógira y levógira, lo que indica la forma en que la atenuación diferencial desortogonaliza las polarizaciones ortogonales incidentes.

Los datos existentes sobre la propagación [Hendry y otros, 1980; Cox y Arnold, 1982; Jakoby y Rüker, 1993] indican que por término medio ΔA toma un valor de 0,25 dB para una atenuación copolar $A_p = 5$ dB, aproximadamente 0,75 dB para $A_p = 10$ dB y aproximadamente 1,5 dB para $A_p = 15$ dB, en este último caso el valor puede acercarse a 2 dB. Por consiguiente, pueden aparecer rotaciones de la polarización importantes en sistemas con amplios márgenes de atenuación. No obstante, la degradación correspondiente de la XPD no es significativa frente a la XPD creada por la degradación de la relación axial de la onda (véase el siguiente punto).

5.3.2.2 Fase diferencial

Todo desplazamiento diferencial de fase $\Delta\beta$ experimentado por una onda incidente provoca una rotación del vector de polarización, a saber [Lee, 1977]:

$$\Delta\tau' = |\phi - \tau| + 0,5 \text{tg}^{-1} [(2 \cotg |\phi - \tau| \cos \Delta\beta / (1 - \cotg^2 |\phi - \tau|))] \quad (5.11)$$

y además, causa una degradación del valor de la relación axial de la tensión, AR , de la onda:

$$AR = 20 \log \{ \text{tg} [0.5 (\pi - \text{sen}^{-1} (\pm \text{sen} \Delta\beta \text{sen} 2 |\phi - \tau|))] \} \quad \text{dB} \quad (5.12)$$

donde también en este caso el signo \pm toma el valor positivo para una polarización elíptica levógira incidente y negativo para una polarización dextrógira incidente.

Las mediciones del desplazamiento diferencial de fase indican que a 12 GHz, $\Delta\beta$ puede tomar un valor próximo a 6° con nieve intensa, a 15° con lluvia, llegando posiblemente a 30° si la lluvia es muy fuerte (cuando la atenuación será también muy alta) y a 20° en los cristales de hielo existentes por encima de la lluvia o en situaciones mixtas de hielo/lluvia. La rotación del plano de polarización $\Delta\tau'$ causada por la fase diferencial rara vez rebasa unos pocos grados.

Entre las anteriores contribuciones, la degradación de la relación axial es el factor contribuyente principal a la XPD en la mayoría de los trayectos de propagación. Las estadísticas de la XPD en el trayecto procedentes de la suma de estos efectos se estiman con una relación entre la XPD y la atenuación en el trayecto según se indica en la Recomendación UIT-R P.618.

5.4 Datos pertinentes sobre la compensación de la polarización cruzada

Los experimentos han demostrado que existe una fuerte correlación entre la despolarización por la lluvia en 6 y 4 GHz en los trayectos Tierra-espacio, tanto a largo plazo como en fenómenos concretos [Ogawa y Allnutt, 1982; Matsunaka y otros, 1983] así como la viabilidad de la compensación de la despolarización en el enlace ascendente utilizando los datos simultáneos de la despolarización en el enlace descendente. Se realizaron esos experimentos con ángulos de elevación de 38° y 9°, respectivamente, en distintos climas. Sólo son manifiestos los efectos de la fase diferencial, incluso con lluvias intensas, y basta la compensación de un solo parámetro para la fase diferencial en 6/4 GHz. Las investigaciones analíticas [Overstreet y Bostian, 1979; McEwan y otros, 1981] muestran que los sistemas de compensación de la despolarización con un solo parámetro también pueden ser útiles para algunas aplicaciones en frecuencias más altas.

Las mediciones efectuadas en 6 y 4 GHz indican que el 99% de las variaciones de la XPD son más lentas que ± 4 dB/s o, lo que es equivalente, inferiores a $\pm 1,5$ grados/s en el desplazamiento medio de la fase diferencial del trayecto. Por consiguiente, la constante de tiempo de un sistema de compensación de la despolarización en esas frecuencias sólo tiene que ser de alrededor de 1 s [Matsunaka y otros, 1983; Allnutt, 1984].

Las mediciones de la polarización cruzada [Howell, 1977; Fimbel y Ramat, 1977] han mostrado también que la fase relativa entre las señales de copolarización y polarización cruzada normalmente es bastante constante (del orden de $\pm 20^\circ$), sin embargo, en ciertas condiciones, pueden producirse cambios bruscos del orden de 180° . Se han observado cambios bruscos de la XPD de varios decibelios en un periodo de 0,1 a 0,3 s, coincidentes con relámpagos, y sugiriendo cambios en la alineación de los cristales de hielo [Howell, 1977; Watson y otros, 1979].

En algunos sistemas de doble polarización que funcionan en frecuencias superiores a 10 GHz, puede necesitarse la diversidad de emplazamiento o el control de la potencia del enlace ascendente para reducir las degradaciones por la lluvia, en particular en ángulos de elevación bajos. Para evaluar la magnitud del componente de polarización cruzada que queda después de aplicar la diversidad de emplazamiento o el control de potencia, se necesitan datos en forma de estadísticas conjuntas de la despolarización y la atenuación (véase el punto 5.2.4). Las mediciones en un ángulo de elevación de $6,6^\circ$ [Yamada y otros, 1985] han mostrado que el centelleo troposférico conduce a un aumento de la duración de los fenómenos de atenuación de nivel bajo, sin causar despolarización, afectando así significativamente a tales estadísticas conjuntas.

5.5 Incorporación de la XPD en el trayecto en el XPI del sistema

Las cifras de polarización cruzada procedentes de la antena del satélite (XPI_{sat}), el trayecto (XPD) y la antena de la estación terrena XPI_{es} son magnitudes complejas con componentes en amplitud y fase que se suman como vectores en el plano complejo. La XPD neta detectada por el receptor es la suma de éstas y posiblemente otras contribuciones del sistema con amplitudes y fases en principio muy diferentes.

En la figura 5.5 se muestra un ejemplo donde los vectores arbitrarios V_1 , V_2 y V_3 se suman en el plano complejo (con referencia a la fase de V_1) para obtener una resultante, \mathcal{R} . Si V_1 y V_2 corresponden a los aislamientos residuales respectivos XPI_{sat} y XPI_{es} , y V_3 a la XPD del trayecto, la resultante \mathcal{R} sólo depende ligeramente de la despolarización en el trayecto y el aislamiento neto viene determinado por los efectos del sistema cuando los aislamientos de la antena son reducidos. Para que la despolarización por el trayecto ejerza un efecto regular y predecible sobre el aislamiento del sistema, la XPD del trayecto durante las condiciones de degradación debe dominar los fenómenos residuales.

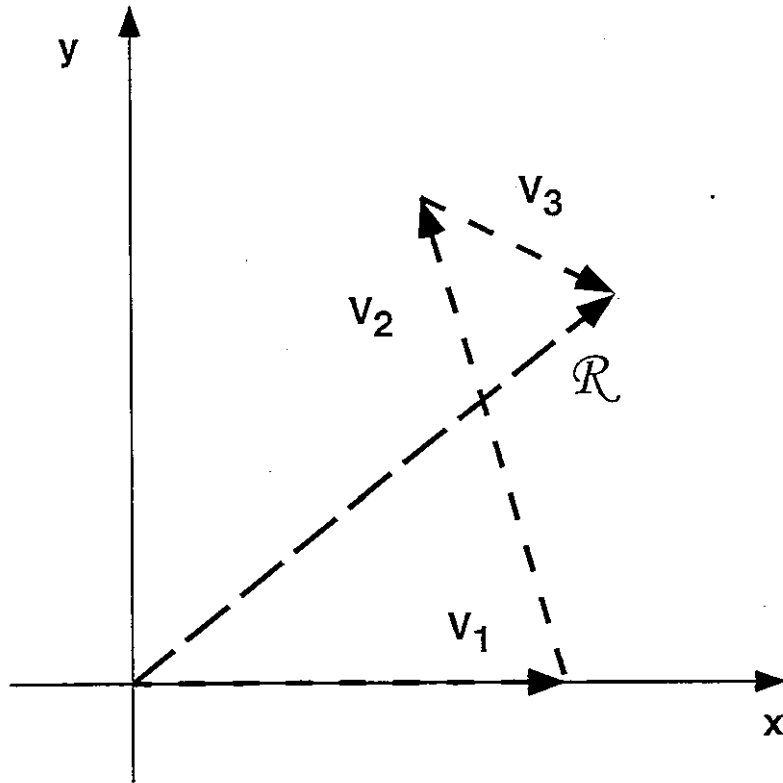


FIGURA 5.5

Suma de tres vectores arbitrarios en el plano complejo para obtener una resultante, \mathcal{R}

En la hipótesis simplificadora de adición (colineal) en el caso más desfavorable, las distintas componentes de la XPD se combinan por adición simple de la tensión:

$$XPD_{neta} = -20 \log [10^{-XPI_{sat}/20} + 10^{-XPD_{trayecto}/20} + 10^{-XPI_{es}/20}] \quad (5.13)$$

En este caso, la XPD neta viene determinada por el mínimo valor (el más pobre) de XPI o XPD en la suma, y siempre es menor (peor) que dicho valor.

El aislamiento de polarización cruzada del sistema en cielo despejado puede variar con las maniobras de mantenimiento en posición del satélite, el error de puntería de la antena y la inclinación del rayo por la refracción que provoca la recepción de la señal fuera del eje (a menos que se compense este efecto mediante un sistema de seguimiento de la antena). En los sistemas operativos con reutilización de frecuencias, los aislamientos residuales de polarización cruzada de las antenas del satélite y la estación terrena se mantienen de una magnitud reducida o se emplea codificación o algún tipo de supresión de la polarización cruzada para mantener un aislamiento tolerable. Si el componente de aislamiento del satélite o la estación terrena es pobre, la calidad de funcionamiento de un sistema en un entorno con polarización doble puede venir determinada por los efectos del equipo, con independencia de las degradaciones del trayecto.

5.6 Ejemplo de cálculo de la XPD del trayecto

Para ilustrar esta utilización, se aplica el procedimiento de la Recomendación UIT-R P.618 a fin de realizar una estimación de la despolarización del trayecto para un trayecto Tierra-espacio representativo. Como el método relaciona los valores estadísticos de la XPD_p con la atenuación copolar debida a la lluvia, al iniciarse los cálculos es necesario conocer los valores de A_p para todos los porcentajes de tiempo de interés. En este ejemplo, se calcula una distribución acumulativa de la atenuación debida a la lluvia para un trayecto de propagación ficticio utilizando el procedimiento de predicción de la citada Recomendación UIT-R P.618. En caso de estar disponibles, los valores estadísticos de la atenuación medida para la frecuencia deseada o los valores estadísticos extrapolados a partir de los datos de atenuación para otras frecuencias, también pueden utilizarse como fuente para determinar las estadísticas de A_p .

5.6.1 Aplicación del método paso a paso

Supóngase que es preciso conocer los valores estadísticos de la degradación para planificar un trayecto de enlace ascendente con polarización lineal de 12 GHz hacia un satélite geostacionario. La estación terrena se encuentra situada a una latitud de 45° y la diferencia entre las longitudes del satélite y la estación es de 55° . El eje de puntería del haz del satélite intercepta a la Tierra a la misma longitud que la del satélite. El terminal se encuentra situado en la zona hidrometeorológica H del UIT-R en la cual cabe esperar que el índice de pluviosidad rebasado durante el 0,01% del tiempo sea de 32 mm/h (véase la Recomendación UIT-R P.837). La altura del terminal sobre el nivel medio del mar es de 100 m (es decir, $h_s = 0,1$ km).

Para la configuración descrita, se ha determinado un ángulo de elevación del trayecto de $15,6^\circ$ y el ángulo de inclinación de la polarización, calculado a partir de la ecuación (5.8c) ha resultado ser de $50,7^\circ$ con respecto a la horizontal en el suelo. Mediante la Recomendación UIT-R P.838, se calculan los coeficientes de atenuación específicos para 12 GHz correspondientes a los ángulos de elevación e inclinación indicados, resultando unos valores de $k = 0,0176$ y $\alpha = 1,207$. Aplicando el procedimiento de predicción de la atenuación debida a la lluvia de la Recomendación UIT-R P.618 (véase en el punto 3.2.5 de este Manual un ejemplo detallado de cálculo), se obtiene la distribución acumulativa de la atenuación debida a la lluvia representada en la figura 5.6.

Una vez que se dispone de los valores estadísticos necesarios de la atenuación debida a la lluvia, la aplicación del método de predicción de la XPD paso a paso del punto 4.1 de la Recomendación UIT-R P.618 es bastante directo, como se indica a continuación:

Paso 1: el término dependiente de la frecuencia para $f = 12$ GHz es:

$$C_f = 30 \log f = 32,4 \quad \text{dB} \quad (5.14)$$

Paso 2: como $8 \leq f \leq 20$ GHz, el coeficiente necesario $V(f)$ en el término dependiente de la atenuación es:

$$V(f) = 12,8 f^{0,19} = 20,5 \quad (5.15)$$

Este coeficiente se utiliza junto con los valores de A_p indicados en la figura 5.6 para construir un cuadro con los términos dependientes de la atenuación debida a la lluvia para los porcentajes de tiempo requeridos a partir de la expresión

$$C_A = V(f) \log A_p = 20,5 \log A_p \quad \text{dB} \quad (5.16)$$

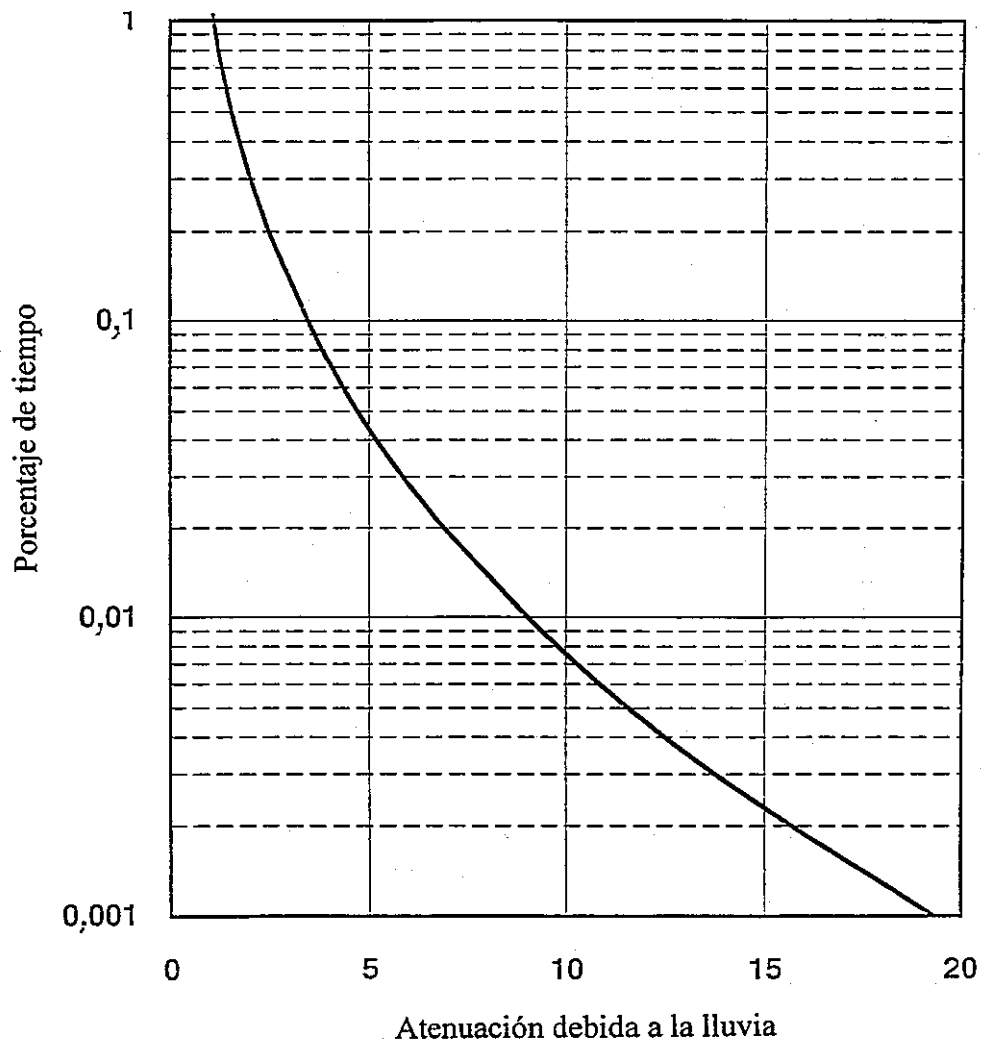


FIGURA 5.6

Estadísticas de la atenuación debida a la lluvia para un trayecto de propagación a 12 GHz en el ejemplo de cálculo

El cuadro resultante no se reproduce pero el procedimiento es bastante directo, especialmente para aplicaciones informáticas o de hoja de cálculo.

Paso 3: el factor de mejora de la polarización para $\tau = 50,7^\circ$ es:

$$C_\tau = - 10 \log [1 - 0,484 (1 + \cos 4\tau)] = 0,17 \quad \text{dB} \quad (5.17)$$

Paso 4: para $\theta = 15,6^\circ$, el término del ángulo de elevación es:

$$C_\theta = - 40 \log (\cos \theta) = 0,65 \quad \text{dB} \quad (5.18)$$

Paso 5: utilizando la curva ajustada del punto 5.2.1.3 se calcula el ángulo de inclinación para los porcentajes de tiempo requeridos a partir de la ecuación (5.7):

$$C_\sigma = 0,13 (\log p)^2 \quad \text{dB} \quad (5.19)$$

Las correcciones se tabulan en función del porcentaje de tiempo, p , como se hizo con los coeficientes C_A en el paso 2.

Paso 6: con los coeficientes calculados en los pasos 1 - 5, la componente de despolarización debida a la lluvia se calcula y se tabula para los porcentajes de tiempo deseados mediante la expresión:

$$XPD_{lluvia} = 32,4 - 20,5 \log A_p + 0,17 + 0,65 + 0,13 (\log p)^2 \quad \text{dB} \quad (5.20)$$

Paso 7: para los porcentajes de tiempo deseados, p , la corrección de la despolarización por cristales de hielo se calcula a partir de la expresión:

$$C_{hielo} = XPD_{lluvia} (0,3 + 0,1 \log p)/2 \quad \text{dB} \quad (5.21)$$

y los cálculos se tabulan de forma similar.

Paso 8: la XPD neta correspondiente a los porcentajes de tiempo requeridos, p , se calcula por último mediante la expresión:

$$XPD_p = XPD_{lluvia} - C_{hielo} \quad \text{dB} \quad (5.22)$$

Los valores estadísticos acumulativos resultantes de la XPD_p se representan para porcentajes de tiempo del 0,001% al 1% en la figura 5.7 a fin de evaluar de la calidad de funcionamiento de propagación en el enlace Tierra-espacio planificado. Las figuras 5.6 y 5.7 se utilizan para estimar los respectivos márgenes de atenuación y de XPD necesarios para lograr el nivel especificado de disponibilidad del trayecto o la calidad de funcionamiento del sistema.

5.6.2 Ejemplo de aplicación de un sistema

La atenuación y la estimación de la XPD de las figuras 5.6 y 5.7 pueden aplicarse para predecir si la calidad de funcionamiento del enlace planificado vendrá determinada por las degradaciones de la despolarización o de la atenuación. Como se ha indicado en el punto 5.2.4, es preferible utilizar a tal efecto las estadísticas conjuntas de la XPD y la atenuación, si se dispone de ellas, pero tales estadísticas son raras. De no ser así, las estadísticas equiprobables de la despolarización y la atenuación normalmente constituyen indicadores fiables de los niveles de degradación relativa.

En la figura 5.8 se representa el gráfico equiprobable deseado de la XPD_p en función de la A_p , obtenido a partir de las figuras 5.6 y 5.7 utilizando el porcentaje de tiempo equiprobable como parámetro. Los niveles de XPD previstos son más bien estrictos con respecto a la atenuación, lo que cabía esperar para la geometría especificada (ángulo de elevación bastante bajo y ángulo de inclinación de la polarización próximo al valor del caso más desfavorable de 45°).

Supóngase en la representación que la disponibilidad del trayecto del enlace ascendente especificado es del 99,99% (es decir, una indisponibilidad del 0,01%). A partir de la figura 5.6 puede determinarse que la atenuación en el trayecto rebasada durante el 0,01% del tiempo es de 9,0 dB. Si puede proporcionarse este margen de desvanecimiento al enlace, la figura 5.8 indica que el nivel de la XPD equiprobable correspondiente es de 13,4 dB, lo que representa para muchos sistemas un nivel significativo de interferencia de polarización cruzada. Si este nivel de la XPD no es tolerable con respecto a los objetivos de calidad de funcionamiento, en el diseño del sistema deben introducirse técnicas de reducción o restauración [Allnutt, 1989] para disminuir los efectos de la degradación por polarización cruzada.

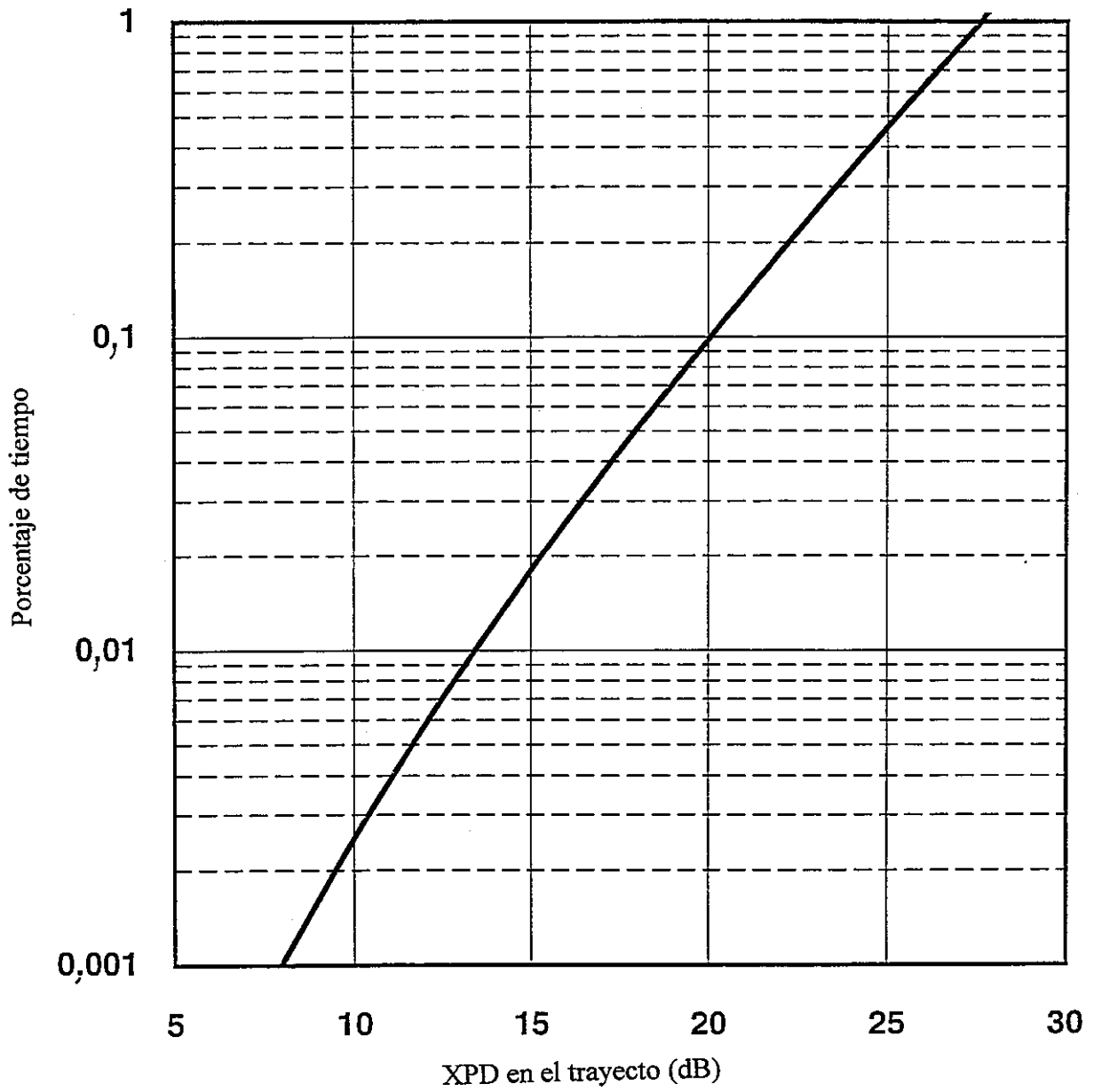


FIGURA 5.7

Estadísticas acumulativas de la XPD para un trayecto de propagación a 12 GHz en el ejemplo de cálculo

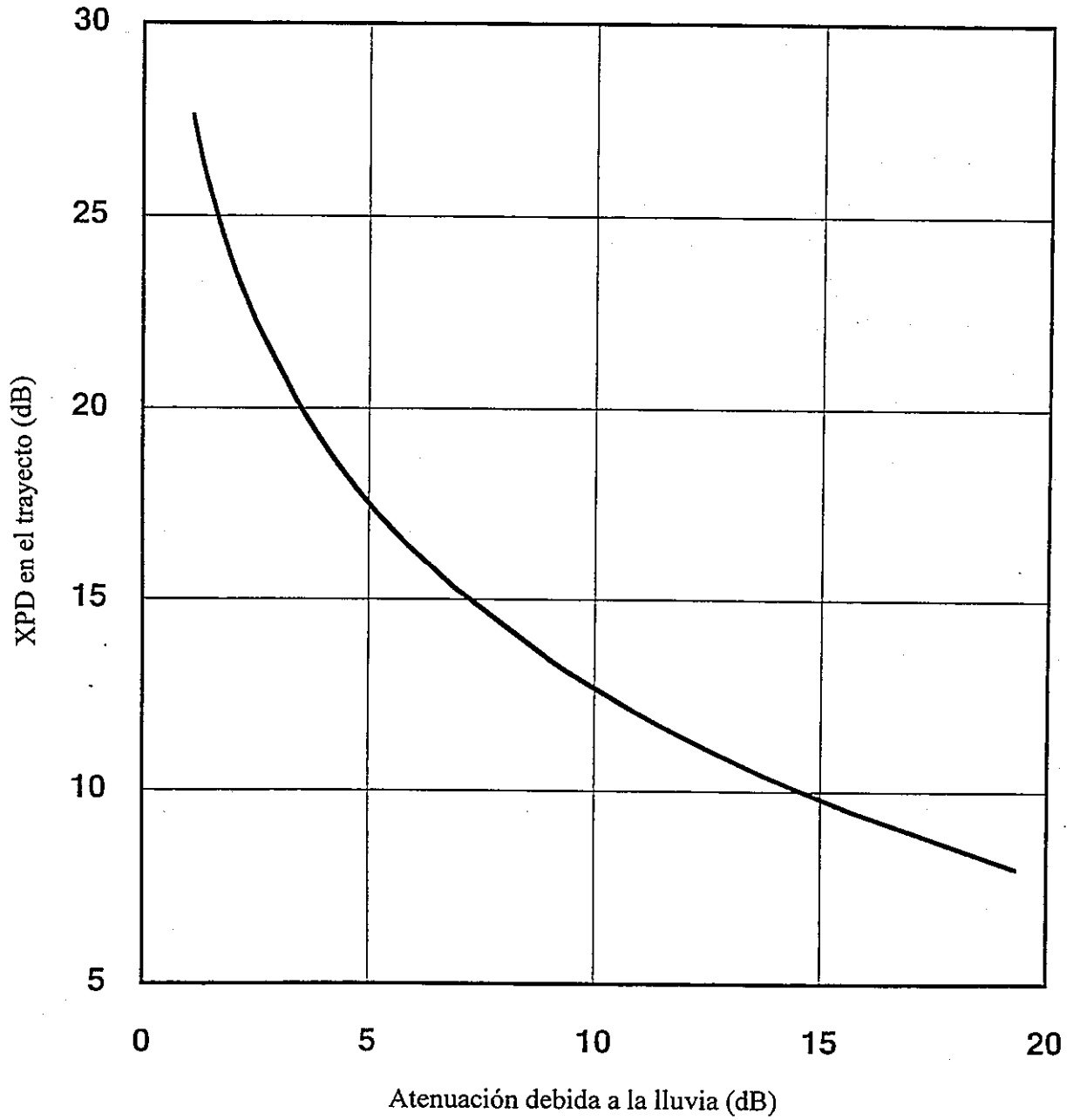


FIGURA 5.8

Curva equiprobable de la XPD del trayecto en función de la atenuación copolar producida por la lluvia según el ejemplo de cálculo

REFERENCIAS PARA EL CAPÍTULO 5

- ALLNUTT, J.E. [1984] The system implications of 6/4 GHz satellite-to-ground signal depolarization: Results from the INTELSAT propagation measurement programme," *Intl. J. Satell. Commun.*, Vol. 2, 73-80.
- ALLNUTT, J.E. [1989] *Satellite-to-Ground Radiowave Propagation*, Chap. 5, Depolarization effects, 249-318. Peter Peregrinus Ltd., Londres.
- BARTON, S.K. [1975] Polarization distortion in systems employing orthogonal polarization frequency reuse. *Marconi Rev.*, XXXVIII, 153-168.
- BECKMANN, P. [1968] *The Depolarization of Electromagnetic Waves*, § 1.5, Mathematical representation of polarization, 24-38. Golem Press, Boulder, EE.UU.
- CHU, T.S. [1971] Restoring the orthogonality of two polarizations in radio communication systems, I. *BSTJ*, Vol. 50, 9, 3063-3069.
- CHU, T.S. [1982] A semi-empirical formula for microwave depolarization versus rain attenuation on Earth-space paths. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-30, 12, 2550-2554.
- COX, D.C. [1981] Depolarization of radio waves by atmospheric hydrometeors in Earth-space paths: A review. *Radio Sci.*, Vol. 16, 5, 781-812.
- COX, D.C. y ARNOLD, H.W. [1982] Results from the 19- and 28-GHz COMSTAR satellite propagation measurements at Crawford Hill. *Proc. IEEE*, Vol. 70, 5, 458-488.
- COX, D.C. y ARNOLD, H.W. [1984] Comparison of measured cross-polarization isolation and discrimination for rain and ice on a 19-GHz space-Earth path. *Radio Sci.*, Vol. 19, 2, 617-628.
- DiFONZO, D.F., TRACHTMAN, W.S. y WILLIAMS, A.W. [1976] Adaptive polarization control for satellite frequency reuse systems. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 6, 2, 253-283.
- DISSANAYAKE, A.W., HAWORTH, D.P. y WATSON, P.A. [1980] Analytical models for cross-polarization on Earth-space radio paths for frequency range 9-30 GHz. *Ann. Télécommunic.*, Vol. 35, 11-12, 398-404.
- FIMBEL, J. y RAMAT, P. [1977] Mesures de l'affaiblissement et de la dépolarization à 20 GHz à partir du satellite ATS-6. *Proc. ATS-6 Meeting*, ESA Publ. SP-131, 79-84, octubre.
- FUKUCHI, H., AWAKA, J. y OGUCHI, T. [1984] Improved theoretical formula for the relationship between rain attenuation and depolarization," *Electron. Lett.*, Vol. 20, 21, 859-860.
- HENDRY, A., McCORMICK, G.C. y ANTAR, Y.M.M. [1980] Differential propagation constants on slant paths through snow as measured by 16.5 GHz polarization diversity radar. *Preprints URSI Comm. F Open Symp.*, Lennoxville, Canadá, 6.7.1-6.7.6, 26-30 de mayo.
- HOWELL, R.G. [1977] Crosspolar phase variations at 20 and 30 GHz on a satellite-Earth path. *Electron. Lett.*, Vol. 13, 405.
- HOWELL, R.G., HARRIS, J.W. y MEHLER, M. [1992] Satellite crosspolar measurements at BT Laboratories. *BT Tech. J.*, Vol. 10, 4, 52-67.

- IPPOLITO, L.J. [1981] Radio propagation for space communications systems. *Proc. IEEE*, Vol. 69, 6, 697-727.
- JAKOBY, R. y RÜCKER, F. [1993] Three years of crosspolar measurements at 12.5, 20 and 30 GHz with the Olympus satellite. *Proc. Olympus Utilisation Conf.*, Sevilla, España, 567-572, 20-22 de abril.
- KOBAYASHI, T. [1977] Degradation of cross-polarization isolation due to rain. *J. Radio Res. Labs. (Japan)*, Vol. 24, 114, 101-107.
- LEE, M.K. [1977] Cross-polarization performance of the RCA Satcom system. *RCA Rev.*, Vol. 38, 171-210, junio.
- MATSUNAKA, N., MATSUZAWA, K., YUKI, H. y FURUTA, O. [1983] Correlation of 6 and 4 GHz rain-induced depolarization at low elevation angles. *Proc. URSI Comm. F Symp.*, Lovaina, Bélgica.
- MAURI, M., PARABONI, A. y TARDUCCI, D. [1987] Depolarization measurements and their use in the determination of dual polarization links performance. *Alta. Freq.*, Vol. LVI, 1-2, 47-55.
- McEWAN, N.J., GUNES, M. y MAHMOUD, M.S. [1981] RF methods for adaptive cancellation of cross-polarization in microwave satellite systems. *IEE Conf. Publ. No. 195*, Pt. 2, 188-192.
- McEWAN, N.J. y LEITAO, M.J. [1982] Propagation studies for feeder link design. Bradford University Research Ltd., Report 329, prepared for ESA under ESTEC Contract No. 4471/80/NL/DG, agosto.
- MORGAN, W.L. y GORDON, G.D. [1989] *Communications Satellite Handbook*, Chap. 6, Satellite Orbits, 774-870. Wiley-Interscience, Nueva York.
- NOWLAND, W.L., OLSEN, R.L. y SHKAROFSKY, I.P. [1977] Theoretical relationship between rain depolarization and attenuation. *Electron. Lett.*, Vol. 13, 22, 676-678.
- OGAWA, A. y ALLNUTT, J.E. [1982] Correlation of 6 and 4 GHz depolarization on slant paths. *Electron. Lett.*, Vol. 18, 5, 230-232.
- OGUCHI, T. [1977] Scattering properties of Pruppacher-and-Pitter form raindrops and cross polarization due to rain: Calculations at 11, 19.3 and 34.8 GHz. *Radio Sci.*, Vol. 12, 1, 41-51.
- OGUCHI, T. [1983] Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors. *Proc. IEEE*, Vol. 71, 9, 1029-1078.
- OLSEN, R.L. y NOWLAND, W.L. [1978] Semi-empirical relations for the prediction of rain depolarization statistics: Their theoretical and experimental basis. *Proc. Int. Symp. on Antennas and Propagation*, 477-480, Sendai, Japón, agosto.
- OVERSTREET, W.P. y BOSTIAN, C.W. [1979] Crosstalk cancellation on linearly and circularly polarized communications satellite links. *Radio Sci.*, Vol. 14, 6, 1041-1047.
- ROGERS, D.V. [1985] Propagation considerations for satellite broadcasting at frequencies above 10 GHz. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol. SAC-3, 1, 100-110.
- ROGERS, D.V. y ALLNUTT, J.E. [1986] System implications of 14/11 GHz path depolarization. Part I: Predicting the impairments. *Intl. J. Satell. Commun.*, Vol. 4, 1-11.

- SHKAROFSKY, I.P. y MOODY, H.J. [1976] Performance characteristics of antennas for direct broadcasting satellite systems including effects of rain depolarization. *RCA Review*, Vol. 37, 279-319. (Sign error in equation 38 corrected in Shkarofsky, I.P. [1977] Depolarisation due to precipitation in satellite communications, *RCA Review*, Vol. 38, 257-309.)
- STUTZMAN, W.L. y RUNYON, D.L. [1984] The relationship of rain-induced cross-polarization discrimination to attenuation for 10 to 30 GHz Earth-space radio links. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-32, 7, 705-710.
- VAN CAPPELLEN, J., MAWIRA, A., NEESSEN, J. y ZELDERS, F. [1980] Joint statistics of attenuation and cross-polarization measured with the OTS satellite. *Proc. NATO/AGARD Conf.*, No. 284, París.
- WATSON, P.A., McEWAN, N.J., DISSANAYAKE, A.W. y HAWORTH, D.P. [1979] Attenuation and cross-polarization measurements at 20 GHz using the ATS-6 satellite with simultaneous radar observations. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-27, 11-17.
- WOLFF, R.S. [1985] Minimization of Faraday depolarization effects on satellite communication systems at 6/4 GHz. *Intl. J. Satell. Commun.*, Vol. 3, 275-286.
- YAMADA, M., YASUKAWA, K., FURUTA, O., KARASAWA, Y. y BABA, N. [1985] A propagation experiment on Earth-space paths of low elevation angles in the 14 and 11 GHz band using the INTELSAT-V satellite. *Proc. Intl. Symp. Ant. Prop.*, Kyoto.
- YAMADA, M. y KARASAWA, Y. [1990] Model testing for XPD on Earth-space paths. Presented at URSI XXIII General Assembly, Praga, República Checa, 28 de agosto - 5 de septiembre.

CAPÍTULO 6

EFFECTOS EN CIELO DESPEJADO

6.1 Pérdidas debidas al desenfoco y a la incoherencia del frente de onda

El descenso regular del índice de refracción con la altura provoca la curvatura del rayo y por consiguiente el efecto de desenfoco para ángulos de elevación bajos [Manual sobre Radiometeorología del UIT-R]. Yokoi y otros, [1970] y Crane, [1971] han evaluado la magnitud del desenfoco del haz de antena. Las pérdidas son independientes de la frecuencia e inferiores a 0,4 dB a 3° de elevación, incluso en valores muy altos de refractividad a nivel del suelo. En el punto 2.3.2 de la Recomendación UIT-R P.618 aparecen expresiones para estimar las pérdidas por desenfoco (dispersión de haz) en trayectos con ángulos de elevación muy bajos. Las pérdidas se tienen en cuenta de forma implícita en los métodos de predicción para desvanecimiento con ángulos bajos que aparecen en los puntos 2.4.2 y 2.4.3 de la citada Recomendación.

Las irregularidades en pequeña escala de la estructura del índice de refracción de la atmósfera provocan incoherencia en el frente de onda de la antena receptora. Ello resulta de las fluctuaciones rápidas de la señal examinadas en la próxima sección y causa una pérdida por acoplamiento antena-medio que puede describirse como un descenso de la ganancia de antena. En la práctica, la pérdida de la señal debida a la incoherencia en el frente de onda sólo tiene probablemente importancia para las antenas de gran abertura, las altas frecuencias y los ángulos de elevación inferiores a 5°. Las mediciones efectuadas en el Japón con una antena de 22 m [Yokoi y otros, 1970] permiten pensar que con un ángulo de elevación de 5°, la pérdida es de unos 0,2 a 0,4 dB en 6/4 GHz. Las mediciones con una antena de 7 m en 15,5 GHz y 31,6 GHz dan pérdidas de 0,3 y 0,6 dB, respectivamente, en un ángulo de elevación de 5° [Yamada y Yokoi, 1974].

6.2 Centelleo y efectos multitrayecto

6.2.1 Consideraciones generales

Las irregularidades en pequeña escala del índice de refracción atmosférico causan variaciones rápidas de la amplitud. Es improbable que, en ausencia de precipitación, los efectos troposféricos produzcan un desvanecimiento intenso en los sistemas de telecomunicación espacial que funcionan en frecuencias inferiores a unos 10 GHz y en ángulos de elevación superiores a 10°. Por el contrario, en ángulos de elevación bajos y en frecuencias superiores a unos 10 GHz, el centelleo troposférico puede provocar a veces intensas degradaciones de la calidad de funcionamiento.

Las irregularidades de la ionosfera pueden provocar también centelleo; el punto 7.4 contiene información sobre este efecto.

Tatarskii presentó una fórmula teórica para estimar las fluctuaciones logarítmicas de la amplitud basándose en el supuesto de que la estructura espacial del índice de refracción atmosférico se halla conforme a un espectro de tipo Kolmogorof [Tatarskii, 1961]. Cuando la turbulencia atmosférica se halla dentro de la subgama inercial de las irregularidades del índice de refracción, la variación del logaritmo de la amplitud en dB aparece dada por la siguiente fórmula:

$$\sigma_x^2 = 42,9 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{\frac{7}{6}} \int_0^L C_n^2(r) r^{\frac{5}{6}} dr \quad \text{dB}^2 \quad (6.1)$$

en donde L es la longitud efectiva del trayecto entre el límite de la turbulencia y el punto de recepción; λ es la longitud de onda de la onda radioeléctrica; y C_n es el parámetro estructural del índice de refracción, que varía a lo largo del trayecto Tierra-espacio. Se sabe que el parámetro estructural depende no sólo de la variación del índice de refracción atmosférico sino también de la escala exterior de irregularidades [Ishimaru, 1978]. Por consiguiente, no es factible identificar directamente los valores de tales parámetros a lo largo de un trayecto oblicuo dado partiendo de las magnitudes meteorológicas generalmente disponibles. Por ello resulta difícil el cálculo de C_n .

Por ese motivo, el ex-CCIR utilizó un modelo empírico basado en datos medidos a una frecuencia de 7,3 GHz, un ángulo de elevación de 1° y un diámetro de antena de 36,6 m [Crane, 1976], con valores extrapolados teóricos para la frecuencia, el ángulo de elevación y el diámetro de antena. Ese modelo inicial se hallaba formado por factores simples y proporcionaba valores estimados cercanos a los valores medidos notificados de aquella época. Sin embargo, el modelo no incluía parámetros meteorológicos y, por consiguiente, no podía tener en cuenta las dependencias regionales y estacionales. El método revisado de la Recomendación UIT-R P.618 se desarrolló para tomar en consideración esos factores, basándose en los trabajos de Karasawa y otros [1988a, b], Crane [1976], Lo y otros [1984], Rucker y Ortgies [1985] y Banjo y Vilar [1986].

6.2.2 Antecedentes del modelo de centelleo

6.2.2.1 Variaciones estacionales y diurnas

Basándose en un cierto número de mediciones del centelleo realizadas [Karasawa y otros, 1988a; Banjo y Vilar, 1986; Vander Vorst y otros, 1982; Rucker y Ortgies, 1985], las variaciones estacionales y diurnas pueden resumirse del siguiente modo:

- 1) En las regiones de latitud media en donde la variación estacional del entorno meteorológico es relativamente amplia, el centelleo presenta una acusada dependencia estacional, con un nivel máximo en los meses de verano. Respecto a las variaciones diurnas, se observó el mayor centelleo alrededor de las 12.00-15.00 horas, pero la variación diurna es menor que la variación estacional en general. La figura 6.1 muestra las variaciones diurnas y estacionales en las mediciones de Yamaguchi ($f = 11,45$ GHz, ángulo de elevación de $6,5^\circ$) [Karasawa y otros, 1988a].
- 2) El valor medio de la intensidad de centelleo para cada mes muestra una alta correlación con el índice de refracción en condiciones de humedad N_{hum} (unidad N) debido al vapor de agua atmosférico, promediado en un mes [Ortgies, 1989]. La figura 6.2 muestra la relación entre la fluctuación cuadrática media promediada en un mes y N_{hum} en las mediciones de Yamaguchi.

En el modelo de predicción del centelleo de la Recomendación UIT-R P.618 se adoptó la relación representada en la figura 6.2, con una pequeña modificación que incorpora datos de centelleo de otras regiones.

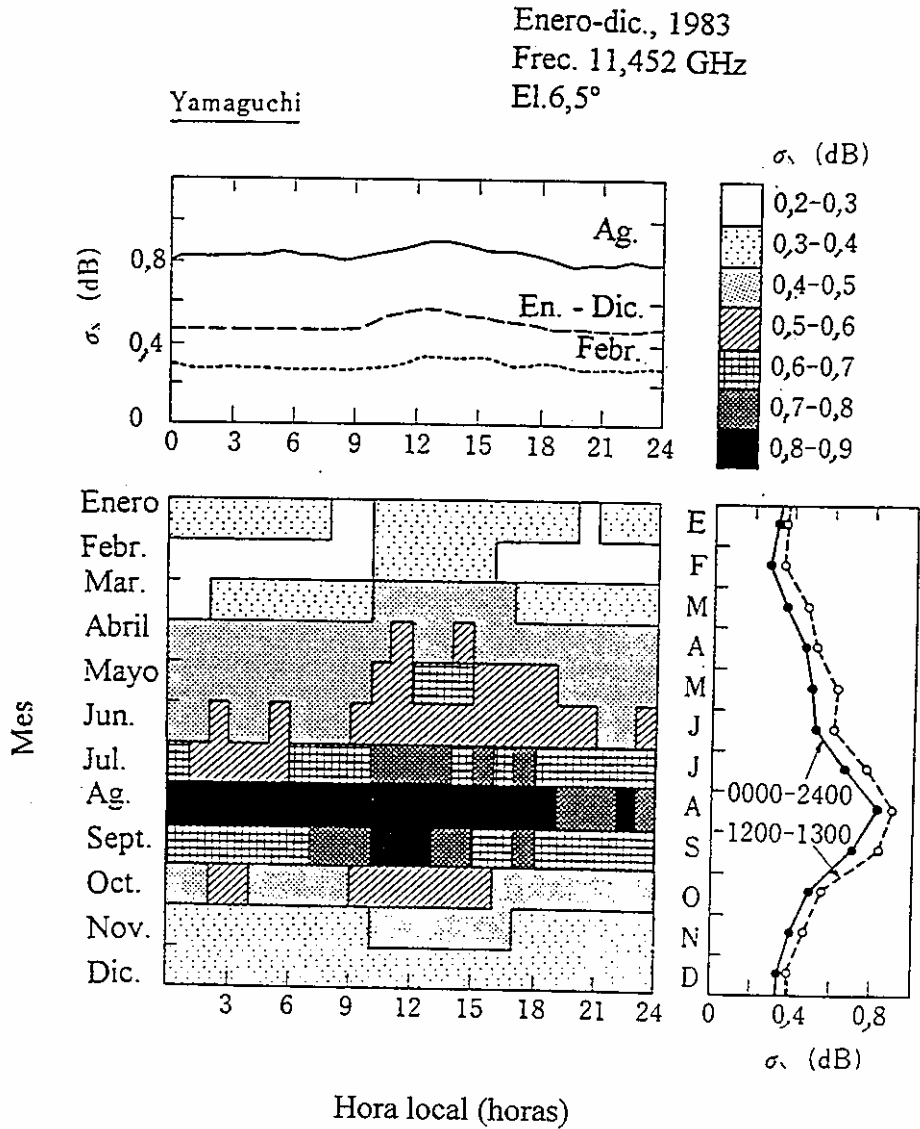


FIGURA 6.1

Variaciones diurnas y estacionales del centelleo en una región de latitud media.
Parte superior izquierda: variación diurna. Parte inferior izquierda: variaciones diurnas y estacionales. Parte inferior derecha: variación estacional.

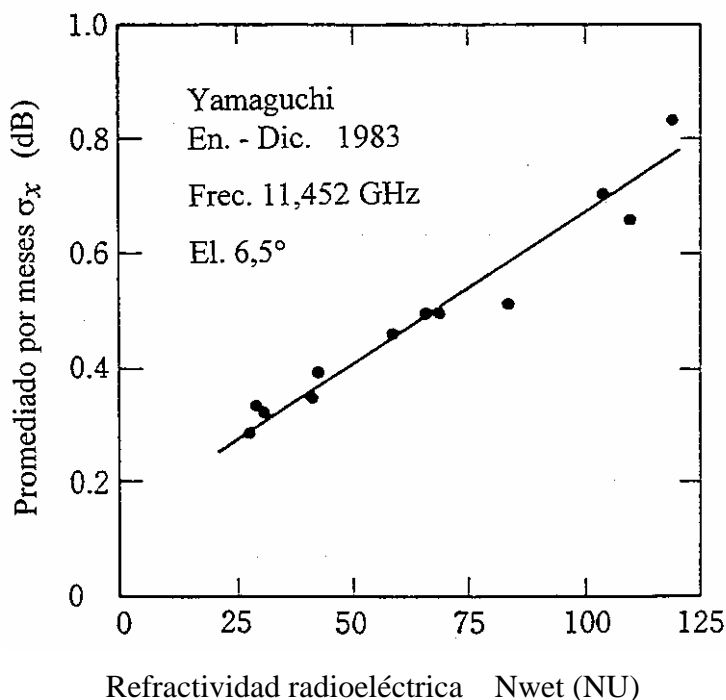


FIGURA 6.2

Relación entre la fluctuación cuadrática media promediada en un mes y N_{hum} en las mediciones de Yamaguchi

6.2.2.2 Dependencia con la frecuencia

Se observó que la dependencia con frecuencia en la variación log-amplitud para frecuencias de 11,5 GHz y 14,2 GHz era el valor de la frecuencia elevado a 0,35 (esto es, $f^{0,35}$) [Karasawa y otros, 1988a]. También es necesario tomar en cuenta los efectos en la frecuencia debidos al tamaño de la antena. Tras eliminar la dependencia debida al efecto promediador de la abertura, se obtuvo una dependencia neta con la frecuencia de $f^{0,45}$ para las frecuencias antes indicadas. La dependencia neta con la frecuencia en el caso de recepción con antenas suficientemente pequeñas, es ligeramente menor que el valor teórico de $f^{7/12}$ derivado del espectro de Kolmogorov. Otros valores experimentales oscilan entre f^0 y $f^{0,5}$ [Yokoi y otros, 1970; Thompson y otros, 1975; Ortgies y Rücher, 1992].

Por esa razón, el método de predicción del UIT-R utiliza el valor de $f^{7/12}$, que es el valor teórico dado en la ecuación (6.1).

6.2.2.3 Dependencia con el ángulo de elevación

La variación de la amplitud debida al centelleo es proporcional a $(\operatorname{cosec} \theta)^n$. En un experimento [Karasawa y otros, 1988a], se recogieron datos a largo plazo para ángulos de elevación θ de 4,0° (satélite a 57°E), 6,5° (60°E) y 9,0° (63°E) en los meses de septiembre y octubre de 1985, 1983 y 1982, respectivamente. Se observó que la potencia de n en $(\operatorname{cosec} \theta)^n$ era de 1,3 aproximadamente, mucho mayor que el valor teórico de 11/12. Basándose en estos datos y en otros datos medidos, se adoptó la expresión $(\operatorname{cosec} \theta)^{1,2}$ para el método de predicción.

6.2.2.4 Dependencia con el diámetro de abertura de la antena

Es bien sabido que la intensidad del centelleo disminuye al aumentar el diámetro de abertura de la antena debido a la incoherencia del frente de onda [Tatarskii, 1961]. Este fenómeno se denomina efecto promediador de la antena. La fórmula que figura en la Recomendación UIT-R P.618 fue la propuesta por Haddon y Vilar [1986].

6.2.2.5 Función densidad de probabilidad (FDP) de las variaciones en el nivel de la señal

En el experimento antes citado [Karasawa y otros, 1988a] se obtuvieron los siguientes resultados:

- 1) La función densidad de probabilidad de las variaciones de amplitud (en dB) en periodos relativamente breves (alrededor de una hora) muestra una distribución gaussiana, incluidos centelleos bastante amplios con fluctuaciones del valor cuadrático medio de hasta 1,6 dB;
- 2) La distribución de la propia desviación típica de la variación a largo plazo en un mes se aproximó con bastante precisión mediante una distribución gamma; asimismo, no hubo una desviación muy amplia con respecto a la distribución gamma en una base anual; y
- 3) Entre el valor promediado mensual m de σ_χ y la desviación típica σ_{σ_χ} de σ_χ , se cumplió la relación $m^2 = 10 \sigma_{\sigma_\chi}^2$, lo que indica que uno de los dos parámetros indispensable para determinar la distribución gamma está directamente determinado por el otro.

Basándose en esto, se obtuvo la fórmula empleada en la Recomendación UIT-R P.618 [Karasawa y otros, 1988b]. La figura 6.3 muestra el factor dependiente del porcentaje de tiempo (η en la figura) para el desvanecimiento y el aumento de la señal. La curva representada por la línea de puntos se utilizó en el desarrollo del método de la Recomendación UIT-R P.618. Por otro lado, ciertos experimentos llevados a cabo en Europa para ángulos de elevación del orden de 30° han demostrado que la densidad de probabilidad de la propia desviación típica para variaciones a largo plazo (punto 2 anterior) se aproxima mejor por una distribución log-normal cuando se introduce una corrección para tener en cuenta el ruido del receptor [Ortgies, 1989; Haddon y Vilar, 1986].

6.2.2.6 Dependencia con la polarización

Se observó que las fluctuaciones medidas simultáneamente con una antena en dos frecuencias distintas guardaban buena correlación en el tiempo. Las mediciones en dos polarizaciones distintas muestran que el centelleo es independiente de la polarización [Cox, 1981].

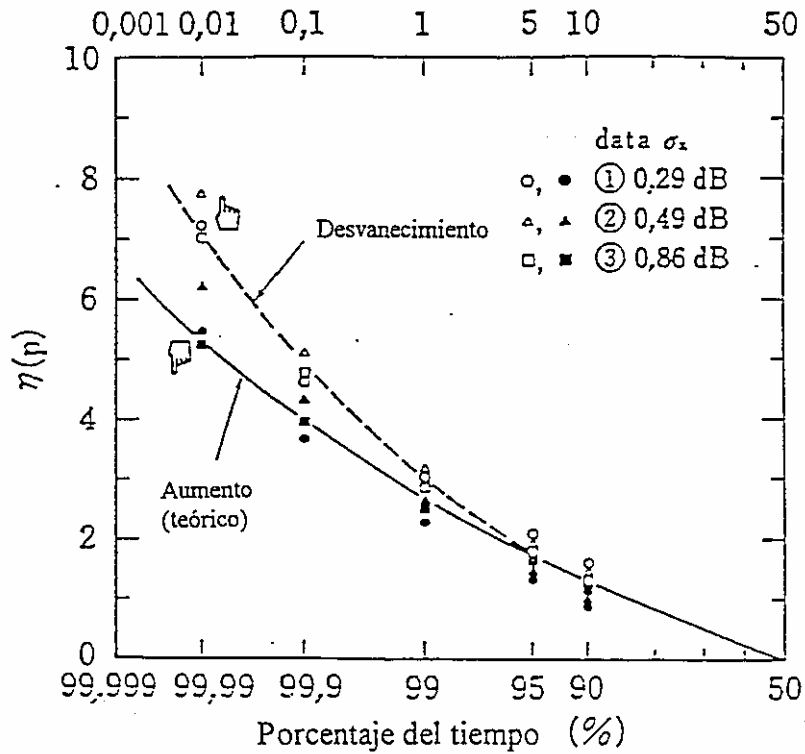


FIGURA 6.3

Factor de porcentaje de tiempo para el desvanecimiento y el aumento

6.2.3 Precisión y gama aplicable del método de predicción

6.2.3.1 Precisión y aplicabilidad de la predicción de la fluctuación cuadrática media

Se evaluó la precisión de la predicción del método UIT-R basándose en los datos experimentales de distintas regiones climáticas.

La figura 6.4 muestra un diagrama de dispersión entre los valores medidos y previstos en distintas condiciones [Karasawa y otros, 1988b]. La gama del parámetro abarca frecuencias comprendidas entre 7,3 y 14,2 GHz, ángulos de elevación de 4° a 30° y distintas regiones climáticas. Puede esperarse que resulte aplicable a frecuencias superiores a 20 GHz. Sin embargo, en ángulos de elevación inferiores a 4° es probable que se produzca un desvanecimiento de la señal desacomodadamente alto provocado por irregularidades del índice de refracción. Por consiguiente, debe prestarse cuidadosa atención a las aplicaciones del modelo en los casos de ángulo de elevación muy bajo (véase el punto 6.2.4).

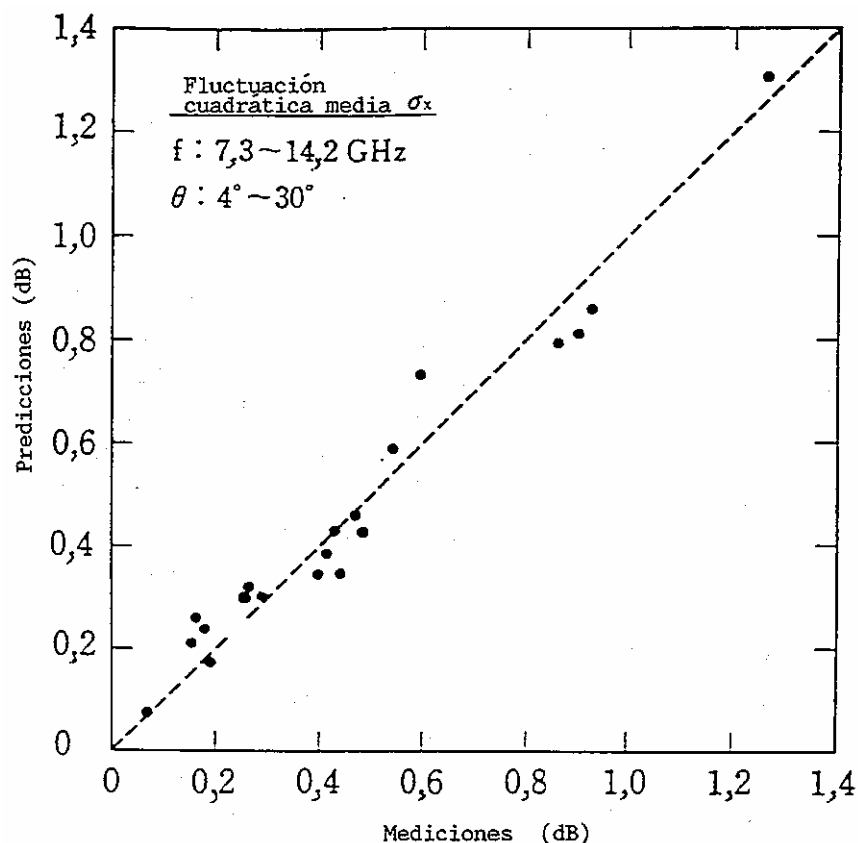


FIGURA 6.4

Diagrama de dispersión de la fluctuación cuadrática media entre mediciones y predicciones en distintas condiciones (véase información detallada en Karasawa y otros [1988b])

6.2.3.2 Precisión y aplicabilidad de la predicción de la función densidad de probabilidad (FDP)

Los datos obtenidos en el Japón y el Reino Unido confirmaron la precisión muy satisfactoria de la predicción [Karasawa y otros, 1988b; Lo y otros, 1984; Banjo y Vilar, 1986]. Sin embargo, se dispone todavía de datos insuficientes para las pruebas completas del modelo. Por otra parte, se poseen actualmente pocos datos para ángulos de elevación bajos (en particular inferiores a 4°), de modo que la aplicabilidad del modelo a los casos de ángulos de elevación muy bajos resulta todavía dudosa.

Por lo tanto, se supone que el modelo de la Recomendación UIT-R P.618 dará una predicción precisa del desvanecimiento por centelleo que se produce en los trayectos Tierra-espacio en ángulos de elevación superiores a unos 4°. Para el caso de los trayectos Tierra-espacio con ángulos de elevación inferiores a 4°, en los puntos 2.4.2 y 2.4.3 de la Recomendación UIT-R P.618 aparece un modelo de predicción empírico.

6.2.4 Variaciones de la señal para ángulos de elevación inferiores a unos 5°

El desvanecimiento refractivo en cielo despejado aumenta rápidamente al disminuir el ángulo de elevación del trayecto. Para ángulos de elevación inferiores a unos 5°, los efectos multitrayecto debidos a la estratificación troposférica a gran escala y a la posible reflexión en la superficie son cada vez más importantes y se producen simultáneamente con el desenfoque (punto 6.1) y el

centelleo en amplitud (punto 6.2.1). El mecanismo de propagación resultante de esta compleja combinación de fenómenos se conoce generalmente con el nombre de desvanecimiento de ángulo bajo. [Olsen, 1995] ha desarrollado un método empírico con objeto de predecir las estadísticas del desvanecimiento para ángulos de elevación inferiores a 5° ; dicho método aparece en los puntos 2.4.2 y 2.4.3 de la Recomendación UIT-R P.618.

6.2.4.1 Modelo empírico

El método del UIT-R predice la distribución del desvanecimiento refractivo para ángulos bajos, $A_{ref}(p)$, resultante de los efectos del desenfoque (dispersión del haz), centelleo y trayecto múltiple. Las condiciones climáticas y del terreno se tienen en cuenta mediante un factor geoclimático, K_w , que es función del factor de latitud C_{Lat} y de un parámetro C_o relativo a las condiciones en la parte inferior (la más afectada) del trayecto de propagación. Los cálculos se realizan en primer lugar para el mes más desfavorable medio a partir del cual pueden obtenerse los valores estadísticos para el año medio. La parte de desvanecimientos suaves de la distribución se basa en una interpolación entre la profundidad de desvanecimiento rebasada durante el 63% del mes más desfavorable medio o del año medio y el porcentaje de tiempo en que la profundidad del desvanecimiento supera el valor de 25 ó 35 dB (dependiendo del comportamiento del modelo).

Como se ha observado que el desvanecimiento para ángulos bajos en los trayectos Tierra-espacio tienen un comportamiento similar a los desvanecimientos por multitrayecto terrenal, el modelo se elaboró combinando los datos limitados relativos al desvanecimiento para ángulos bajos con los conocimientos mucho más amplios que se tienen sobre los desvanecimientos multitrayecto en los enlaces terrenales. Los datos para ángulos bajos medidos en la gama de ángulos de elevación entre 1° y 4° para una frecuencia de 7,3 GHz en Ottawa [McCormick y Maynard, 1972; Webber y McCormick, 1980] y una frecuencia de 38 GHz en Alert [Lam, 1987] ayudaron a establecer la dependencia con el ángulo de elevación. Los datos para 4 y 30 GHz obtenidos en St. John's [Webber y McCormick, 1980] apoya la utilización de la misma dependencia con la frecuencia para el desvanecimiento multitrayecto que la utilizada en los enlaces terrenales (Recomendación UIT-R P.530). Los datos obtenidos en Ottawa (45°N , 75°W) y en Alert (83°N , 62°W) junto con los datos para un ángulo de 1° recogidos en Eureka (80°N , 86°W) [Strickland y otros, 1977; Kurniawan, 1986] para un ángulo de $3,3^\circ$ en Goonhilly (50°N , 5°W) [Bryant, 1992] y para un ángulo de $3,2^\circ$ en Isfjord (78°N , $13,6^\circ\text{E}$) [Gutteberg, 1983] suponen un apoyo adicional para la dependencia con el ángulo de elevación y la frecuencia así como una prueba razonable para la utilización de la misma variabilidad climática en el desvanecimiento multitrayecto que la utilizada para los enlaces terrenales. Los diámetros de antena utilizados para las mediciones oscilaron entre 0,45 m y 9 m, cubriendo la amplia gama de tamaños que normalmente se utilizarán en la práctica.

El comportamiento del modelo se ilustra en la figura 6.5 donde se comparan las distribuciones del desvanecimiento con cielo despejado y en el mes más desfavorable medidas y previstas en Alert para varios ángulos de elevación. Al evaluar el método con los datos para trayectos con ángulo de elevación muy bajo, se obtuvieron unos valores para la media y la desviación típica del error de predicción de 0,4 dB y 5,3 dB, respectivamente, utilizando la interpolación y extrapolación logarítmica descritas en el punto 6.2.4.1.2 para obtener el predictor climático requerido, p_L [Olsen, 1995]. Sin embargo, como la base de datos es reducida y la mayoría de estos datos también se utilizaron en el desarrollo del método, cabe prever que los errores de predicción que aparecerán en la práctica serán algo superiores. Para realizar una comparación puede señalarse que la desviación típica del error de predicción calculada a partir de un conjunto mucho mayor de datos sobre propagación terrenal es de 6,3 dB [Olsen y Tjelta, 1996].

En los dos puntos siguientes figuran detalles adicionales sobre el modelo.

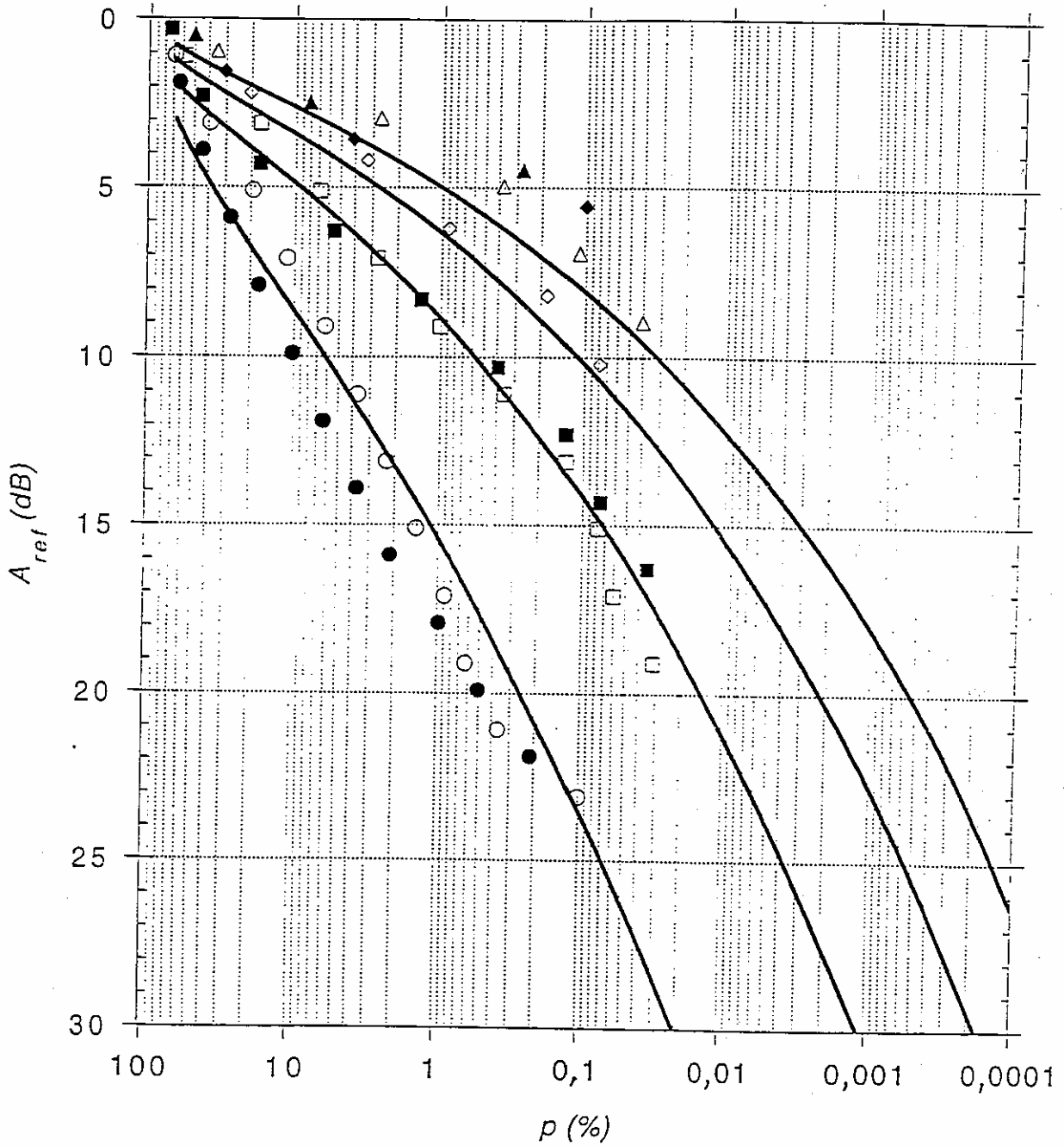


FIGURA 6.5

Comparación de las distribuciones del desvanecimiento en cielo despejado en el mes más desfavorable medidas y previstas en Alert

Datos medidos para los ángulos de elevación especificados: ○, ● 1,5°; □, ■ 2,5°; ◇, ◆ 3,5°; △, ▲ 4,5°. Los puntos de datos de color blanco y de color negro representan los distintos conjuntos de datos en los ángulos indicados.

— Distributions previstas (basadas en un valor $p_L = 0,37\%$ determinado mediante extrapolación logarítmica a partir de la figura 9 de la Recomendación UIT-R P.453-5).

El máximo porcentaje de tiempo mensual rebasado para cada nivel de desvanecimiento define la distribución del mes más desfavorable para cada ángulo de elevación.

6.2.4.1.1 Pérdidas por dispersión del haz

La ecuación (23) de la Recomendación UIT-R P.618 para las pérdidas por dispersión del haz A_{bs} en enlaces situados en latitudes bajas y medias es un ajuste de regresión de la curva A de la figura 1 de la Recomendación UIT-R P.834 para ángulos de elevación de 1,5°; 2,5° y 3,5° [Crane, 1971] y se considera típicamente representativa para los valores medianos a largo plazo de las pérdidas por dispersión del haz en emplazamientos continentales de tierra adentro. Los datos indican que A_{bs} presenta un valor mucho más alto en latitudes elevadas en los meses más cálidos del año [Lam, 1987; Kurniawan, 1986]. Por consiguiente, el coeficiente de la pendiente de la ecuación (24) de la Recomendación UIT-R P.618 se basa en un ajuste de regresión de los valores medianos de la profundidad de desvanecimiento en el mes más desfavorable para emplazamientos de elevada latitud, una vez deducida la atenuación atmosférica estimada por el método de la Recomendación UIT-R P.676.

6.2.4.1.2 Distribución del desvanecimiento

Las ecuaciones (38) y (39) de la Recomendación UIT-R P.618 se basan en las hipótesis, soportadas por las evaluaciones del modelo, de que el desvanecimiento más profundo se debe al multitrayecto y la distribución del desvanecimiento viene descrita aproximadamente por un modelo similar al de los trayectos terrenales en el método 1 de la Recomendación UIT-R P.530. Los términos de la frecuencia en estas ecuaciones son los mismos de los del método 1 tras redondear sus valores. Los datos para el trayecto Tierra-espacio a 4 y 30 GHz [Webber y McCormick, 1980] están en consonancia con el modelo, al igual que los resultados de pruebas basándose en datos para frecuencias entre 6 y 38 GHz. El término de la longitud del trayecto en el método 1 se combinó con una expresión de la inclinación del trayecto para obtener los términos del ángulo de elevación en las ecuaciones (38) y (39).

El factor geoclimático K_w para el mes más desfavorable medio que aparece en la ecuación (33) de la Recomendación UIT-R P.618 tiene en cuenta los efectos climáticos, especialmente la aparición variable de capas atmosféricas con gradientes de refractividad extremos. Aunque K_w debe incluir en principio los efectos de las capas de superficie y elevadas, la variable del predictor p_L (aplicable a los 100 m inferiores de la atmósfera) proporciona buenos resultados en el método. A diferencia del caso terrenal, se consideró innecesario utilizar un factor de corrección distinto para amplias masas de agua en los trayectos Tierra-espacio. La expresión empírica utilizada en el método para el factor geoclimático logarítmico G_a para el año medio se basa en parte en los datos terrenales y en parte en los datos del trayecto Tierra-espacio. La parte llana de las distribuciones acumulativas observadas se adapta bien a la misma relación empírica para desvanecimientos poco profundos utilizada en los enlaces terrenales.

Los mapas de las figuras 7 a 10 de la Recomendación UIT-R P.453 se utilizan para determinar la variable del predictor p_L en la ecuación (33) de la Recomendación UIT-R P.618. Las pruebas del modelo [Olsen, 1995] demuestran que los valores de p_L más adecuados se determinan mediante la interpolación logarítmica entre los contornos del mapa o, si se requieren valores de p_L para porcentajes de tiempo inferiores al 1%, mediante extrapolación logarítmica basada en los dos contornos más próximos.

Puede que en algunos casos sea conveniente obtener expansiones de los mapas de la Recomendación UIT-R P.453 en la zona del enlace en cuestión y trazar con precisión el punto correspondiente al emplazamiento de la estación terrena para obtener el valor de p_L . Como los mapas se han dibujado con una proyección Mercator, debe utilizarse la siguiente relación para trazar la latitud del emplazamiento ξ :

$$\Delta z_L = \Delta z \left[\frac{\ln[\operatorname{tg}(45^\circ + 0,5\xi)] - \ln[\operatorname{tg}(45^\circ + 0,5\xi_1)]}{\ln[\operatorname{tg}(45^\circ + 0,5\xi_2)] - \ln[\operatorname{tg}(45^\circ + 0,5\xi_1)]} \right] \quad (6.2)$$

siendo Δz la distancia (por ejemplo, en mm) entre las líneas de la cuadrícula de latitud inferior y superior más próximas para las latitudes ξ_1 y ξ_2 , respectivamente (por ejemplo, 30° y 45°) y Δz_L la distancia necesaria (por ejemplo, en mm) entre la línea de la cuadrícula de la latitud más baja y el punto correspondiente a la estación terrena terminal. La longitud del emplazamiento puede determinarse mediante interpolación lineal.

6.2.4.2 Características del desvanecimiento para ángulos bajos

El método de predicción del UIT-R proporciona valores estadísticos acumulativos del desvanecimiento. Otras características del desvanecimiento para ángulos bajos pueden determinarse por referencia a los datos medidos. Por ejemplo, en mediciones efectuadas en Isfjord para un ángulo de elevación de $3,2^\circ$, se observó que los valores estadísticos del desvanecimiento seguían las distribuciones de Nakagami-Rice (véase la Recomendación UIT-R P.1057) con valores medios de la relación de potencia entre los componentes aleatorio y constante de -20 dB, -13 dB y -10 dB para el mejor mes, el mes más desfavorable y el día más desfavorable, respectivamente [Gutteberg, 1981].

Los valores estadísticos de la dinámica del desvanecimiento para los datos a 6 GHz medidos en Canadá en un trayecto de 1° [Strickland y otros, 1977] indicaron que el 90% de los desvanecimientos que rebasaban el valor de 20 dB duraban menos de unos 11 segundos y el 90% de los desvanecimientos que rebasaban el valor de 12 dB duraban menos de unos 35 segundos. La tasa de cambio del nivel de la señal rebasaba el valor de 1 dB/segundo durante el 1% del tiempo y de 4 dB/segundo durante el 0,1% del tiempo. También se dispone de estadísticas de la tasa de cambio para frecuencias de 4 GHz y 30 GHz [Webber y McCormick, 1980] y 38 GHz [Lam, 1987]. (Los análisis de la dinámica del desvanecimiento dependen de forma crítica del muestreo de los datos y de las técnicas de filtrado utilizadas y, evidentemente, en la comparación de los resultados deben utilizarse parámetros similares.)

La diversidad espacial puede ser útil para reducir los márgenes de desvanecimiento necesarios en los enlaces Tierra-espacio que funcionan con ángulos de elevación muy bajos. Se han llevado a cabo diversas mediciones de diversidad. En el experimento realizado a 6 GHz citado anteriormente, se obtuvo una buena mejora por diversidad con una separación vertical entre terminales de 180 m pero los resultados para la separación horizontal no fueron concluyentes [Strickland y otros, 1977]. Con otra medición distinta [McCormick y Maynard, 1972] se logró una buena calidad de funcionamiento para una separación horizontal de 300 m mientras que en otra medición [Strickland, 1981], la mejora fue escasa con una separación de 500 m. Las mediciones en diversidad de emplazamientos realizadas con un ángulo de elevación de $3,2^\circ$ en Isfjord [Gutteberg, 1983] demostraron una disminución significativa del desvanecimiento conjunto en comparación con el desvanecimiento en un solo trayecto, pero no pudo determinarse con exactitud si la mejora se debió a la separación lateral (1 150 m) entre los dos emplazamientos o a la diferencia en la altura relativa de los terminales vistos desde el satélite.

Los datos de diversidad obtenidos en Eureka [Strickland, 1981] se han utilizado para diseñar un sistema por diversidad espacial operativo a 6/4 GHz en ese emplazamiento. En las medidas llevadas a cabo posteriormente a lo largo de un periodo de casi nueve meses para caracterizar la calidad de funcionamiento del sistema en esos trayectos se observó un importante desvanecimiento refractivo durante el verano y se demostró que puede obtenerse una reducción muy significativa del tiempo de

indisponibilidad del trayecto utilizando diversidad de emplazamientos. Las aplicaciones de la diversidad de emplazamientos para el caso de desvanecimiento refractivo son similares en su concepto a las empleadas para superar el problema del desvanecimiento debido a la lluvia (véase el punto 3.3.1 de este Manual), pero la escala es distinta porque los mecanismos de propagación correspondientes son diferentes.

6.3 Retardos de propagación

Los retardos de propagación adicionales sumados al retardo ocasionado por la propagación en el espacio libre se deben a la refracción a través de la atmósfera, la precipitación y la ionosfera. La Recomendación UIT-R P.834 proporciona un método para estimar el retardo de propagación medio (y la variación del retardo debido a la troposfera). En frecuencias superiores a 10 GHz, el retardo de tiempo ionosférico es en general inferior al de la troposfera; (véase el punto 7.3.2).

La determinación del alcance con una precisión de centímetros exige el examen cuidadoso de las distintas contribuciones al exceso de tiempo. La contribución del vapor de agua, que llega a 10 cm para un trayecto cenital y una atmósfera de referencia con una concentración superficial de vapor de agua de $7,5 \text{ g/m}^3$ (altura de escala de 2 km), resulta la mayor fuente de incertidumbre. Ello es así aún incluso cuando la atmósfera seca añade 2,3 m al exceso de tiempo en el trayecto cenital [Flock y otros, 1982].

La media y la varianza del retardo de propagación en una atmósfera sin precipitaciones pueden deducirse de la relación de regresión existente entre la refractividad en la superficie y el error de distancia desarrollada en EE.UU. [Bean y Dutton, 1966]. En otra publicación aparecen los detalles del procedimiento, en particular para calcular la varianza del error de retardo [Nuspl y otros, 1975].

La mayor parte de las estadísticas publicadas sobre refractividad en la superficie se dan para cada mes, pero pueden obtenerse estimaciones de la desviación típica en cualquier periodo T combinando las estimaciones de un mes con el espectro de frecuencias semiempírico del tiempo de propagación. La figura 6.6 muestra las curvas de la desviación típica del retardo a lo largo de un trayecto Tierra-espacio bidireccional en función de la "frecuencia de corte" $f_c = 1/T$ y para desviaciones típicas en un mes de 10, 20 y 30 unidades N ; f_c es la frecuencia por debajo de la cual las fluctuaciones del retardo resultan cada vez más atenuadas debido al periodo de observación finito T . Se ha supuesto un ángulo de elevación de un trayecto típico de $\theta = 30^\circ$ con una longitud efectiva del trayecto de 10 km y velocidades medias del viento, en dirección perpendicular al trayecto, de $U = 2, 5$ y 10 m/s . Para ángulos de elevación distintos de 30° , los valores obtenidos de la representación gráfica así como las velocidades de viento indicadas deben dividirse por el factor $2 \text{ seno } \theta$. Puede suponerse que la distribución de las fluctuaciones del retardo es gaussiana.

Las curvas de la figura 6.6 se basan en un espectro de frecuencias medio y no reflejan la distribución de las variaciones extremas que pueden producirse. Un límite superior aproximado para periodos de observación cortos T viene dado por $\sigma_{\Delta\tau} \approx 0,25/\text{sen } \theta$ (ns) para $\theta \geq 10^\circ$.

Puede estimarse la modificación del retardo de propagación debida a una célula de lluvia que cruce el trayecto de propagación utilizando un enfoque análogo al usado para calcular la atenuación [Nuspl y otros, 1975] en la gama de hasta unos 15 GHz. Dado que la variación en el retardo es de 0,2 ns aproximadamente, puede ignorarse normalmente la variación en el retardo debida a la lluvia.

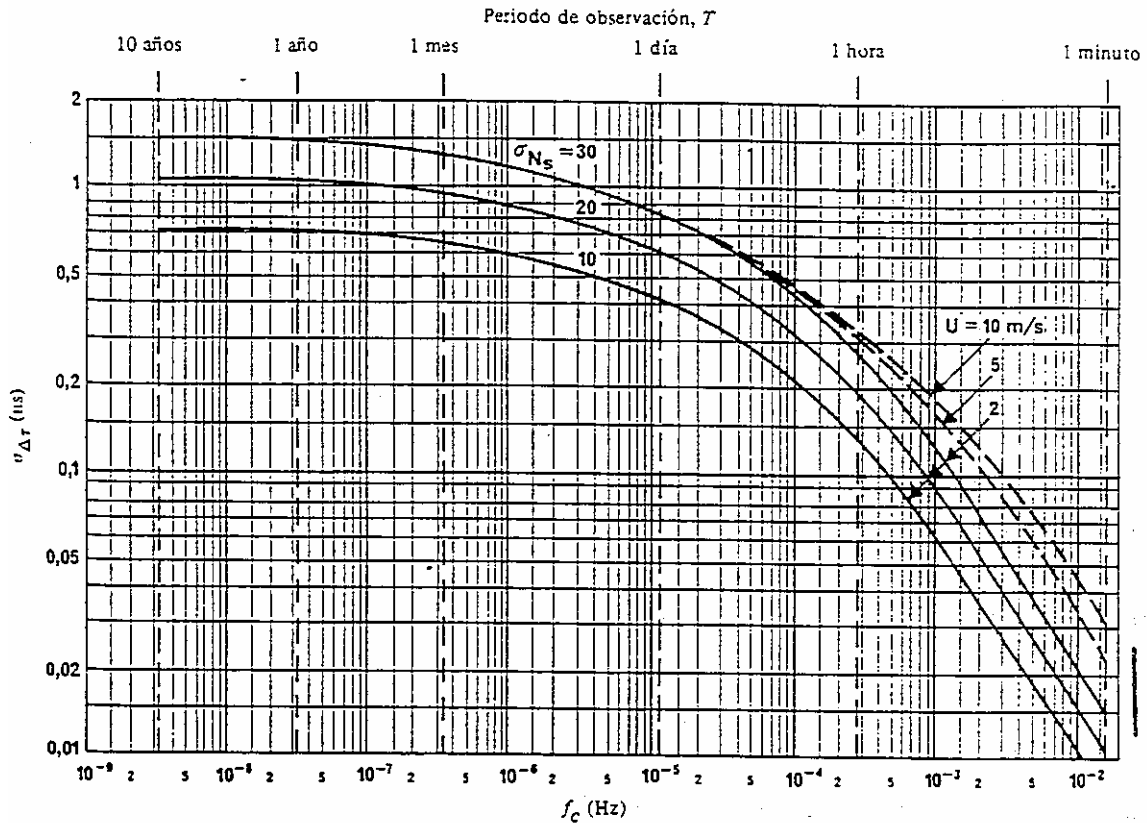


FIGURA 6.6

Varianza acumulativa de $\sigma_{\Delta\tau}$ en función de frecuencia, para un trayecto bidireccional Tierra-espacio, con un ángulo de elevación de 30° . Cada curva corresponde a un valor determinado de σ_{N_s} para un periodo de un mes

6.4 Ángulo de llegada

El gradiente del índice de refracción de la atmósfera provoca una curvatura del rayo y, por consiguiente, el ángulo de llegada es distinto al calculado basándose en la geometría del trayecto. Como el índice de refracción varía ampliamente con la altitud, la variación del ángulo de llegada es mucho mayor en elevación que en acimut. Además, las irregularidades turbulentas del índice de refracción pueden provocar centelleos del ángulo de llegada. Ambos efectos disminuyen notablemente al aumentar el ángulo de elevación y normalmente son insignificantes para ángulos de elevación superiores a 10° . Los efectos son independientes de la frecuencia.

La información publicada sobre mediciones de la variación del ángulo de llegada no es muy amplia. En la Recomendación UIT-R P.618 (punto 7) figuran valores típicos de la variación del ángulo de llegada debido a la refracción y las fluctuaciones a corto plazo causadas por la turbulencia. Las causas físicas se discuten más detalladamente en la Recomendación UIT-R P.834 y en el Capítulo 4 del Manual sobre Radiometeorología del UIT-R. En [Fukuchi y otros, 1988] aparece un análisis estadístico de las variaciones a corto plazo.

Para ángulos de elevación muy bajos, y en ciertas condiciones meteorológicas, puede que sea necesario tener en cuenta la aparición de conductos. En la Recomendación UIT-R P.834 y en el Manual sobre Radiometeorología del UIT-R figuran modelos de predicción e información general.

REFERENCIAS PARA EL CAPÍTULO 6

- BANJO, O.P. y VILAR, E. [1986] Measurement and modeling of amplitude scintillations on low-elevation Earth-space paths and impact on communication systems, *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-34, 8, 774-780.
- BEAN, B.R. y DUTTON, E.J. [1966] Radio Meteorology, Dover Publications, Nueva York, EE.UU.
- BRYANT, D.L. [1992] Low elevation angle 11 GHz beacon measurements at Goonhilly Earth station. *BT Technol. J.*, vol. 10, pp. 68-75.
- COX, D.C. [1981] Depolarization of radio waves by atmospheric hydrometeors on Earth-space paths: A review, *Radio Sci.*, Vol. 16, 5, 781-812.
- CRANE, R.K. [1971] Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in centimetre and millimetre wavelength bands, *Proc. IEEE*, Vol. 59, 173-188.
- CRANE, R.K. [1976] Low elevation angle measurement limitations imposed by the troposphere: An analysis of scintillation observations made at Haystack and Millstone, MIT Lincoln Lab. Tech. Rep. 518, Lexington MA (EE.UU.).
- FLOCK, W.L., SLOBIN, S.D. y SMITH, E.K. [1982] Propagation effects on radio range and noise in Earth-space telecommunications, *Radio Sci.* Vol. 17, 6, 1411-1427.
- FUKUCHI, H., NAKAMURA, K., OKAMOTO, K. y OKUYAMA, T. [1988] Angle-of-arrival fluctuation at 20 GHz on Earth-space path, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 2, 671-681.
- GUTTEBERG, O. [1981] Measurement of tropospheric fading and cross-polarization in the arctic using Orbital Test Satellite, IEE Conf. Publ. No. 195, Part 2, 71-75. *IEE Second Int. Conf. Antennas Propagat.*, Heslington, York, Reino Unido.
- GUTTEBERG, O. [1983] Low elevation propagation in high-latitude regions. Final Report, ESTEC Contract no 5032/82 NL GM(SC), Norwegian Telecom, Kjeller, Noruega, abril.
- HADDON, J. y VILAR, E. [1986] Scattering induced scintillations from clear air and rain on Earth space paths and the influence of antenna aperture, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-34, 8, 646-657.
- ISHIMARU, A. [1978] *Wave propagation and scattering in random media*, Nueva York: Academic Press.
- KARASAWA, Y., YASUKAWA, K. y YAMADA, M. [1988a] Tropospheric scintillation in the 14/11 GHz bands on Earth-space paths with low elevation angles, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-36, 4, 563-569.
- KARASAWA, Y., YAMADA, M. y ALLNUTT, J.E. [1988b] A new prediction method for tropospheric scintillation on Earth-space paths, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-36, 11, 1608-1614.
- KURNIAWAN, Z. [1986] Satellite link performance monitoring - Project Hurricane. Final Report, Telesat Canada, enero.
- LAM, W.I. [1987] Low angle signal fading at 38 GHz in the high arctic. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 35, pp. 1495-1499.

- LO, P., BANJO, O.P. y VILAR, E. [1984] Observation of amplitude scintillations on a low elevation Earth-space path, *Electron. Lett.*, Vol. 20, 7.
- McCORMICK, K.S. y MAYNARD, L.A. [1972] Measurements of SHF tropospheric fading along Earth-space paths at low elevation angles, *Electron. Lett.*, Vol. 8, 10, 274-276.
- NUSPL, P.P., DAVIES, N.G. y OLSEN, R.L. [1975] Ranging and synchronization accuracies in a regional TDMA experiment, *Proc Third Int. Digit. Sat. Comm. Conf.*, Kyoto, Japón.
- OLSEN, R. [1995] Summary of worldwide procedures for the prediction of clear-air fading distributions on very-low-angle satellite links. Symp. Proc., URSI Open Symp. on Wave Propagation and Remote Sensing, Ahmedabad, India, 20-24 de noviembre.
- OLSEN, R. y TJELTA, T. [1996] World-wide techniques for predicting the multipath fading distribution on terrestrial LOS links: Background and results of tests. (Se publicará en *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1997).
- ORTGIES, G. [1989] Ein modell zur Beschreibung von Mikrowellenszintillationen mit Hilfe meteorologischer Parameter, *Kleinheubacherberichte* Vol. 32, 309-315.
- ORTGIES, G. y RÜCKER, F. [1992] Frequency-scaling of slant-path amplitude scintillations, *Proc URSI Comm. F Open Symposium*, Ravenscars (Reino Unido), 7.8.1-7.8.5.
- RÜCKER, F. y ORTGIES, G. [1985] Diurnal and seasonal variations of OTS amplitude scintillations, *Electron. Lett.*, Vol. 21, 4, 143-145.
- STRICKLAND, J.I. [1981] Site diversity measurements of low-angle fading and comparison with a theoretical model, *Ann. des Telecomm.*, Vol. 36, 7-8, 457-463.
- STRICKLAND, J.I, OLSEN, R.O. y WERSTIUK, H.L. [1977] Measurements of low angle fading in the Canadian Arctic, *Ann. des Telecomm.*, 11-12, 530-535.
- TATARSKII, V.I. [1961] *Wave propagation in a turbulent medium* (translated by R.A. Silverman), Nueva York, McGraw-Hill.
- THOMPSON, M.C., WOOD, L.E., LAMES, H.B. y SMITH, D. [1975] Phase and amplitude scintillation in the 10 to 40 GHz band, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-23, 6, 792-797.
- VANDER VORST, A. VANHOENACKER, D. y MERCIER, L. [1982] Fluctuations on OTS-Earth co-polar link against diurnal and seasonal variations, *Electron. Lett.*, Vol. 18, 21, 915-917.
- WEBBER, R.V. y McCORMICK, K.S. [1980] Low angle measurements of the ATS-6 beacons at 4 and 30 GHz, *Ann. des Telecomm.*, Vol. 35, 11-12, 494-500.
- YAMADA, M. y YOKOI, H. [1974] Flux density of celestial radio sources at 15.5 31.6 GHz, *Electron. Comm. Japan*, Vol. 57-B, 3, 79-85.
- YOKOI, H., YAMADA, M. y SATOH, T. [1970] Atmospheric attenuation and scintillation of microwaves from outer space, *Publ. Astronom. Soc. Japan*, 22, 511-524.

CAPÍTULO 7

PROPAGACIÓN TRANSIONOSFÉRICA

7.1 Introducción

En las frecuencias de ondas métricas y superiores, las ondas radioeléctricas son capaces de penetrar la ionosfera y de proporcionar, por consiguiente, comunicaciones transionosféricas. En las comunicaciones transionosféricas, las degradaciones más importantes debidas a la ionización de fondo comprenden la Rotación de Faraday y el retardo de grupo. Esas degradaciones guardan todas relación con el contenido electrónico total (CET) a lo largo del trayecto de propagación. Por otra parte, la degradación principal debida a las irregularidades es el fenómeno llamado corrientemente centelleo. Estas serán el tema principal del presente capítulo.

7.2 Contenido electrónico total (CET)

Denominado N_T , el contenido electrónico total (CET) puede determinarse del siguiente modo:

$$N_T = \int_s N_e(s) ds \text{ electrones/m}^2 \quad (7.1)$$

siendo N_e la densidad electrónica (en m^{-3}) a lo largo del trayecto y s el trayecto de propagación en metros. Normalmente, N_T varía entre 1 y 200 unidades CET (1 unidad CET = 10^{16} electrones/ m^2). Incluso conociendo el trayecto de propagación exacto es difícil evaluar N_T , porque N_e es muy variable en el espacio y en el tiempo [Davies, 1980; Soicher y Gorman, 1985].

Para fines de modelación, el valor de CET se indica habitualmente para un trayecto vertical utilizando la relación $N_e(s) ds = N_e(h) \sec \phi dh$, donde ϕ es el ángulo cenital del rayo en una altura ionosférica media (~ 400 km). Conociendo el CET puede calcularse, para las aplicaciones de comunicaciones, la rotación de Faraday y el retardo de grupo. Se facilita a continuación el cálculo.

7.3 Efectos debidos a la ionización de fondo

7.3.1 Rotación de Faraday

En la propagación a través de la ionosfera, una onda con polarización lineal experimentará una rotación progresiva de su plano de polarización a causa de la presencia del campo geomagnético y de la anisotropía del medio plasmático. La magnitud de la rotación de Farady, Ω , dependerá de la frecuencia de la onda radioeléctrica, la intensidad del campo geomagnético y la densidad electrónica del plasma, del siguiente modo:

$$\Omega = \frac{KM}{f^2} N_T \quad (7.2)$$

donde $K = 2,36 \times 10^4$ (en unidades MKS), Ω se da en radianes, M es el valor de $B_L \sec \phi$ a 420 km de altura, B_L es el componente longitudinal de la inducción magnética de la Tierra, en Tesla, a lo largo del trayecto del rayo, ϕ es el ángulo cenital del rayo y f es la frecuencia en hertzios. En la figura 7.1 se representan los valores típicos de Ω en función de la frecuencia para valores representativos de CET.

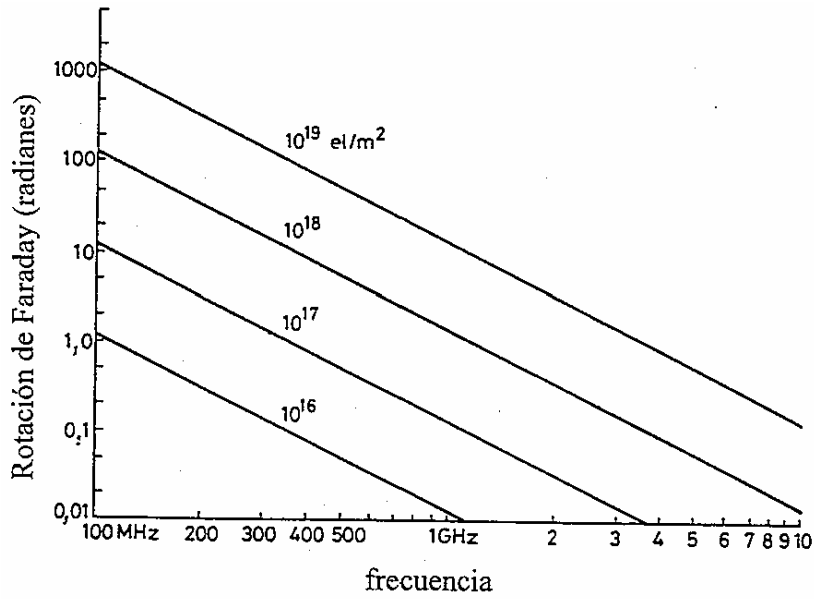


FIGURA 7.1

Rotación de Faraday en función del CET y la frecuencia

En el cuadro 7.1 se indica la rotación de Faraday en grados que se superará en determinados porcentajes de tiempo, en una frecuencia de 1 GHz, durante un año completo de observación, en los periodos de actividad solar máxima ($R_{12} = 157$) y mínima ($R_{12} = 42$).

CUADRO 7.1

Rotación de Faraday en 1 GHz rebasada durante determinados porcentajes de tiempo

Porcentaje de tiempo	99	90	50	10	1	0,1	0,01	Periodo	R_{12}
Rotación (grados)	3	7	23	43	64	75	82	1979-80	157
	1	2	7	14	30	41	47	1977-78	42

7.3.2 Retardo de grupo

La presencia de partículas cargadas en la ionosfera disminuye la velocidad de propagación de las señales radioeléctricas a lo largo del trayecto y produce un adelanto de fase. El retardo que supera al tiempo de propagación en el espacio libre, denominado corrientemente $\Delta\tau_g$, se conoce con el nombre de retardo de grupo. Es un factor importante que ha de tenerse en cuenta en los sistemas de comunicaciones digitales y de posicionamiento de la navegación. Esa cantidad se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\Delta\tau_g = 1,34 \times 10^{-7} N_T / f^2 \tag{7.3}$$

donde

- $\Delta\tau_g$ = tiempo de retardo en segundos con respecto a la propagación en vacío
- f = frecuencia en Hz
- N_T = CET en electrones/ m^2 .

En la figura 7.2 se representa el retardo de tiempo $\Delta\tau_g$ en función de la frecuencia f para varios valores de contenido electrónico a lo largo del trayecto del rayo.

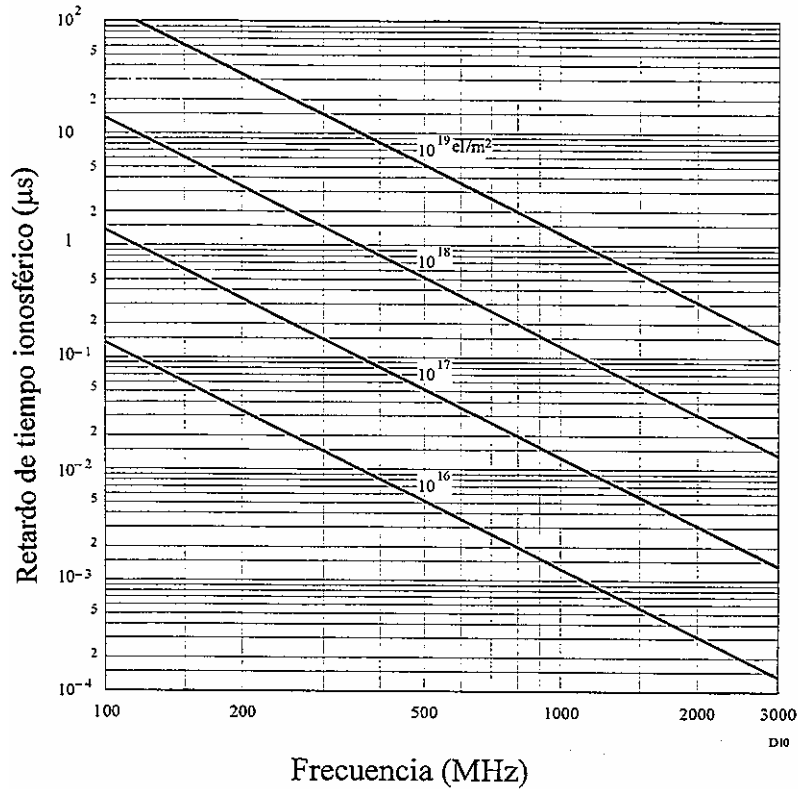


FIGURA 7.2

Retardos de tiempo ionosférico en función de la frecuencia para distintos valores de contenido electrónico

La figura 7.3 muestra el porcentaje anual de horas diurnas en que el retardo de tiempo rebasará 20 ns durante un periodo de actividad solar relativamente alta, utilizando un modelo de contenido electrónico total ideado por Bent y otros [1981].

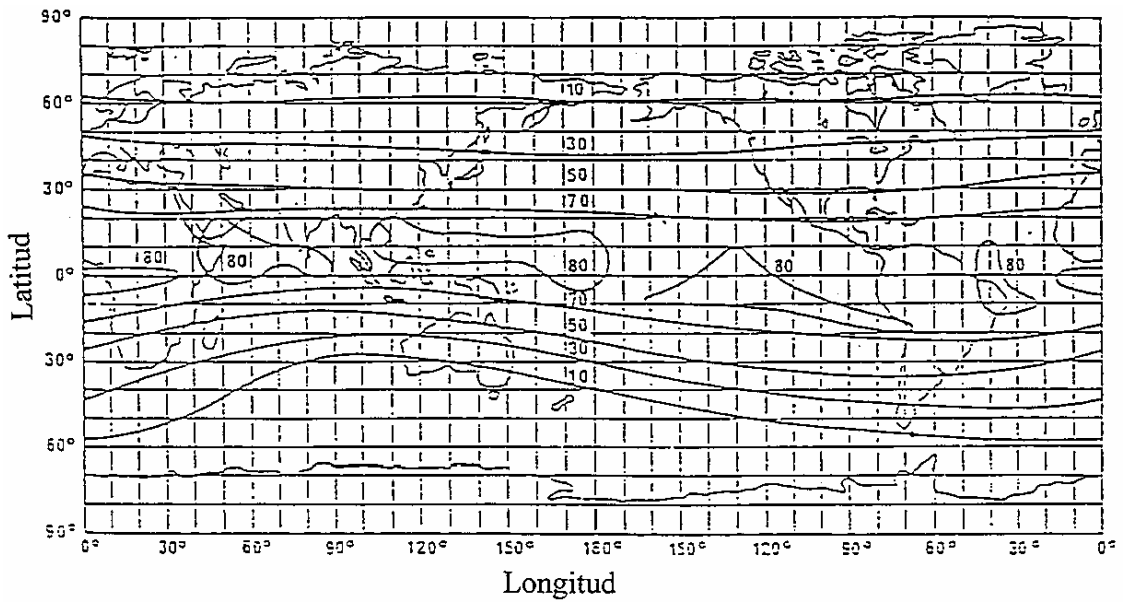


FIGURA 7.3

Contornos del porcentaje del promedio anual de horas diurnas en las que el retardo de tiempo con incidencia vertical a 1,6 GHz rebasará los 20 ns (número de manchas solares = 140)

7.3.3 Dispersión

Cuando las señales transionosféricas ocupan una anchura de banda significativa, el retardo de propagación (función de la frecuencia) introduce dispersión. El retardo diferencial a través de la anchura de banda es proporcional a la densidad electrónica integrada a lo largo del trayecto del rayo. Por ejemplo, en el caso de un contenido electrónico integrado de 5×10^{17} electrones/m², una señal con una longitud de impulso de 1 μ s mostrará un retardo diferencial de 0,02 μ s a 200 MHz, mientras que a 600 MHz el retardo será sólo de 0,00074 μ s (véase la figura 7.4) [Millman y Olsen, 1980; Mawira, 1990].

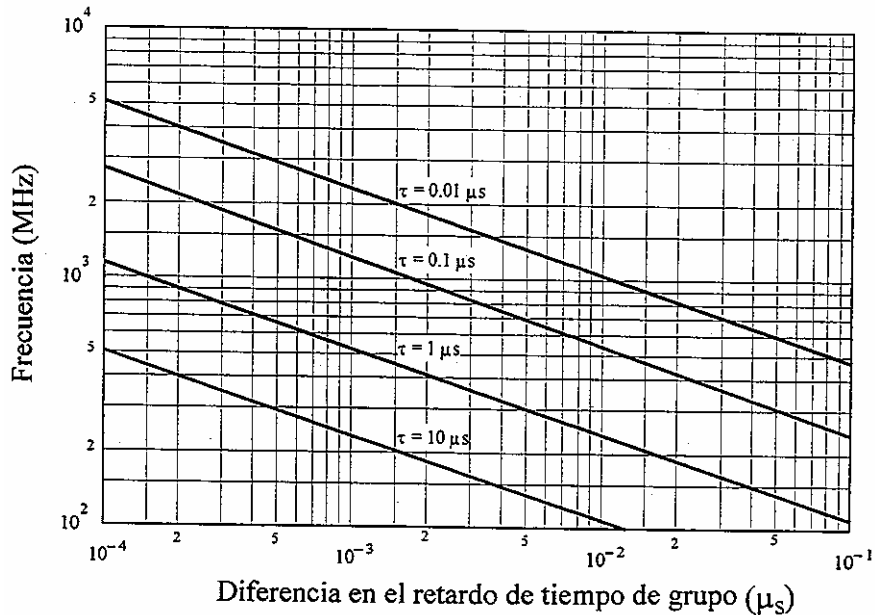


FIGURA 7.4

Diferencia de retardo de tiempo entre las frecuencias superior e inferior del espectro de un impulso de anchura τ , transmitido a través de la ionosfera, en una transversal unidireccional

7.3.4 Desplazamiento de frecuencia Doppler

El efecto del cambio de frecuencia debido a la variabilidad temporal de la ionosfera sobre la frecuencia aparente de la portadora, esto es, la portadora desplazada por el efecto Doppler, es un efecto de segundo orden. Por ejemplo, para $f = 1,6$ GHz (sistema GPS), el cambio de frecuencia observada Δf en latitudes altas es:

$$\frac{\Delta f}{f} < 10^{-9} \quad (7.4)$$

7.3.5 Dirección de llegada del rayo

Cuando las ondas radioeléctricas se propagan oblicuamente a través de la ionosfera, experimentan una refracción que produce un cambio en la dirección de llegada del rayo.

7.3.6 Absorción

Cuando no se dispone de información directa puede calcularse la pérdida por absorción ionosférica a partir de los modelos disponibles conforme a la relación $(\sec \phi)/f^2$, en el caso de frecuencias superiores a 30 MHz, siendo ϕ el ángulo cenital del trayecto de propagación en la ionosfera

[Davies, 1990]. En las regiones ecuatorial y de latitud media, las ondas radioeléctricas de las frecuencias superiores a 70 MHz garantizarán la penetración de la ionosfera sin absorción significativa.

Las mediciones efectuadas en latitudes medias muestran que, en el caso de una transversal unidireccional de la ionosfera en incidencia vertical, la absorción a 30 MHz en condiciones normales es típicamente de 0,2 a 0,5 dB. En el curso de una erupción solar aumentará la absorción, pero será inferior a 5 dB. El aumento de la absorción puede producirse en latitudes altas a causa de los fenómenos del casquete polar y la aurora; esos dos fenómenos se producen a intervalos aleatorios, tienen duración variable y sus efectos dependen del emplazamiento de los terminales y del ángulo de elevación del trayecto. Por consiguiente, para obtener el diseño de sistema más eficaz han de tratarse esos fenómenos en forma estadística, teniendo en cuenta que la duración de la absorción auroral es del orden de horas y de la absorción del casquete polar es del orden de días.

7.3.6.1 Absorción auroral

La absorción auroral se produce debido a un aumento de la concentración electrónica en las regiones D y E causado por los electrones energéticos incidentes. La absorción se observa en una gama de latitudes de 10° a 20°, centrada cerca de la latitud de máxima aparición de las auroras visuales. Se produce en forma de una serie de aumentos discretos de la absorción, cada uno de duración relativamente breve (unos minutos a unas horas), con una duración media de 30 minutos aproximadamente; muestran habitualmente una estructura temporal irregular [Hargreaves y Cowley, 1967]. Los aumentos nocturnos suelen consistir en incrementos rápidos y uniformes y disminuciones lentas. Las magnitudes típicas a 127 MHz aparecen en el cuadro 7.2.

CUADRO 7.2

Absorción auroral para 127 MHz (dB)

Porcentaje del tiempo	Ángulo de elevación	
	20°	5°
0,1	1,5	2,9
1	0,9	1,7
2	0,7	1,4
5	0,6	1,1
50	0,2	0,4

7.3.6.2 Absorción por el casquete polar

La absorción por el casquete polar se observa en casos relativamente excepcionales en latitudes geomagnéticas superiores a 64° [Bailey, 1964]. La absorción se produce por ionización en alturas mayores de unos 30 km. Suele consistir en fenómenos discretos, aunque a veces superpuestos, que están casi siempre asociados a fenómenos solares discretos. La absorción es de larga duración y resulta detectable sobre los casquetes polares iluminados por el sol. La absorción por el casquete polar se produce más corrientemente en el curso del máximo nivel del ciclo de actividad solar, en el que puede haber de 10 a 12 fenómenos al año. Uno de esos fenómenos puede durar hasta varios días. Ello contrasta con la absorción auroral, que con frecuencia está bastante localizada y que tiene variaciones en periodos de minutos.

Una característica notable de la absorción por el casquete polar es la gran reducción de la absorción que se produce en las horas de oscuridad para una determinada tasa de producción electrónica.

7.4 Efectos debidos a las irregularidades de la ionización

7.4.1 Efectos del centelleo

A lo largo de un trayecto de propagación transionosférica, una de las alteraciones más intensas de las señales entre las ondas métricas y la banda C está producida por el centelleo ionosférico. Principalmente por mecanismos de dispersión hacia adelante y difracción, las estructuras irregulares en pequeña escala de la densidad de ionización producen el fenómeno del centelleo, en el cual la señal constante en el receptor es reemplazada por otra que presenta fluctuaciones de amplitud, fase y dirección aparente de llegada. En función del esquema de modulación del sistema, los distintos aspectos del centelleo afectan de diferente modo a la calidad de funcionamiento [Yeh y Liu, 1982]. El parámetro utilizado más corrientemente para caracterizar las fluctuaciones de intensidad es el índice de centelleo, definido por la siguiente fórmula:

$$S_4 = \left(\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \right)^{1/2} \quad (7.5)$$

donde I es la intensidad de la señal y $\langle \rangle$ indica la promediación en el tiempo [Briggs y Parkin, 1963].

El índice de centelleo S_4 está relacionado con las fluctuaciones de cresta a cresta de la intensidad. La relación exacta depende de la distribución de la intensidad. Esta tiene una descripción óptima en la distribución de Nakagami [Fang y Liu, 1987] para una amplia gama de valores de S_4 . A medida que $S_4 \rightarrow 1,0$ se acerca a la distribución de Rayleigh. En algunos casos, S_4 puede pasar de 1, alcanzando valores tan altos como 1,5. Ello se debe al enfoque. En valores inferiores a 0,6, S_4 muestra una dependencia de la frecuencia $f^{-1,5}$ constante para la mayor parte de las observaciones en multifrecuencia realizadas en las bandas de ondas métricas y decimétricas. Sin embargo, las recientes observaciones ecuatoriales realizadas en frecuencias de gigahertzios sugieren la existencia de valores superiores a 1,5 de índice espectral. A medida que el centelleo aumenta de intensidad de tal modo que S_4 excede de 0,6, disminuye el índice espectral. Ello se debe a la saturación del centelleo por el desvanecimiento de Rayleigh bajo la fuerte influencia de la dispersión múltiple.

De modo empírico, el cuadro 7.3 proporciona una conversión apropiada entre S_4 y las fluctuaciones aproximadas de cresta a cresta P_{fluc} en decibelios [Fang y Liu, 1987].

CUADRO 7.3

Cuadro de conversión empírica de índices de centelleo

S_4	P_{fluc}
0,1	1,5
0,2	3,5
0,3	6
0,4	8,5
0,5	11
0,6	14
0,7	17
0,8	20
0,9	24
1,0	27,5

7.4.2 Dependencia geográfica, estacional y solar

Desde el punto de vista geográfico existen dos zonas intensas de centelleo, una en latitudes altas [Hoppe y otros, 1991] y la otra centrada en $\pm 20^\circ$ alrededor del ecuador magnético, como se muestra en la figura 7.5. Se han observado varios centelleos hasta en frecuencias de gigahertzios en esos dos sectores, siendo más marcados en el sector ecuatorial, mientras que en las latitudes medias los centelleos afectan principalmente a las señales en ondas métricas [Basu y otros, 1988]. En todos los sectores se produce un marcado máximo nocturno de la actividad, [Aarons, 1982, 1993].

En latitudes polares y ecuatoriales, los cambios más espectaculares tienen lugar en un ciclo de manchas solares, produciendo el periodo de máxima actividad solar fuertes efectos en la región anómala del ecuador ($12 - 15^\circ$ del ecuador magnético como muestra la figura 7.5) y en la región polar. En la región auroral, las tormentas magnéticas desempeñan un papel dominante al producir centelleos durante cualquier parte del ciclo de manchas solares. En años de baja actividad solar, la región polar y la región anómala presentan durante la mayor parte del tiempo niveles bajos de desvanecimiento. Para el centelleo ecuatorial de 1,5 a 4 GHz, la actividad de cresta es la ilustrada en la figura 7.6 [Aarons, 1993]. Las fluctuaciones cresta a cresta en el ecuador magnético son del orden de 5 - 6 dB a 1,5 GHz en años de actividad solar tanto intensa como baja. En latitudes anómalas, las fluctuaciones cresta a cresta pueden ser superiores a 20 dB durante muchas horas en años de actividad solar máxima. A 4 GHz, las fluctuaciones cresta a cresta de nivel de la señal de radio frecuencia rebasan los 10 dB de magnitud.

En lo que se refiere a las características temporales, la tasa de desvanecimiento del centelleo ionosférico es de alrededor de 0,1 Hz a 1 Hz. Un fenómeno de centelleo suele comenzar tras la puesta de sol ionosférica local, pudiendo durar de 30 minutos a varias horas. En una estación ecuatorial, y en años de actividad solar máxima, el centelleo ionosférico se produce casi todas las tardes después de la puesta de sol.

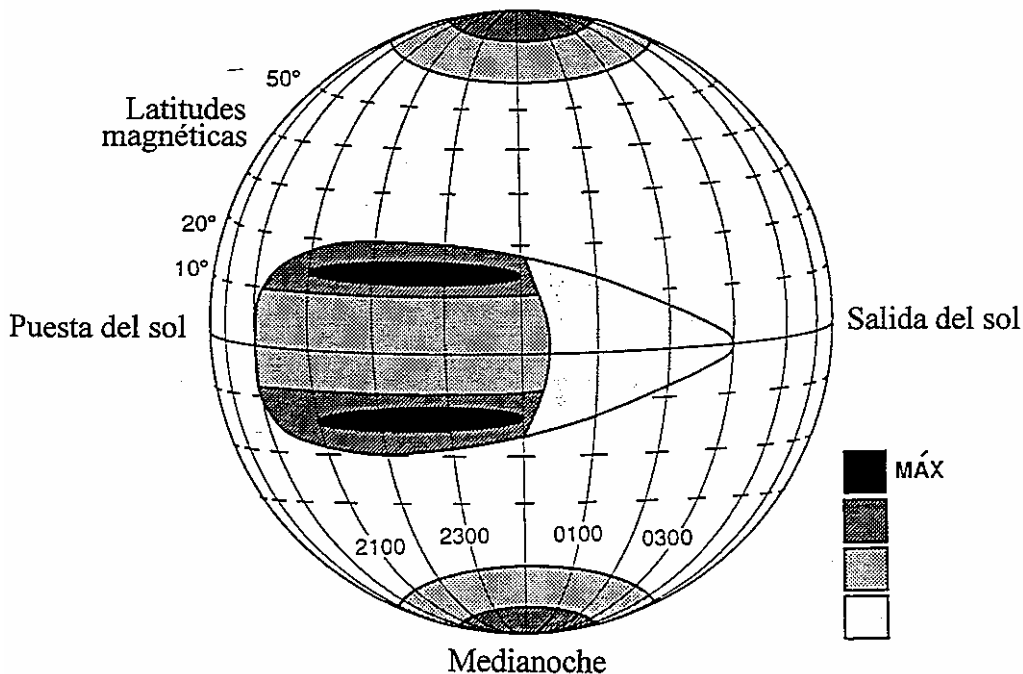


FIGURA 7.5

Imagen ilustrativa de las profundidades de desvanecimiento durante años de alta actividad solar

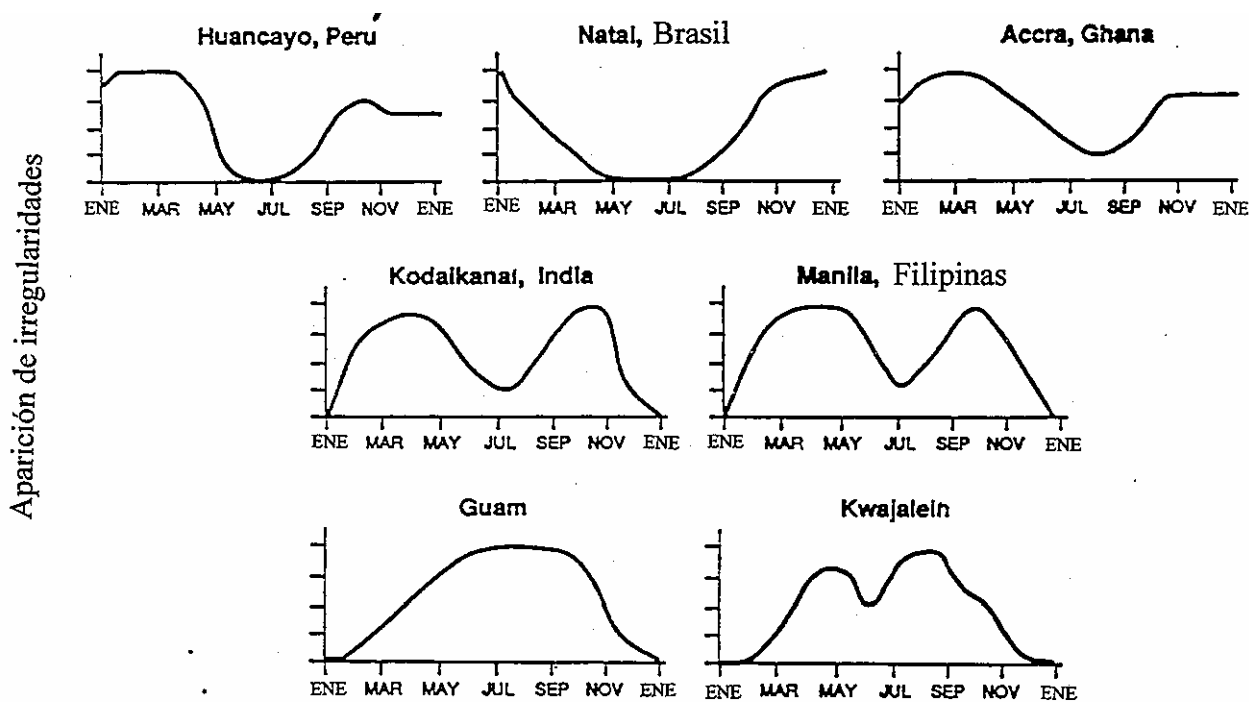
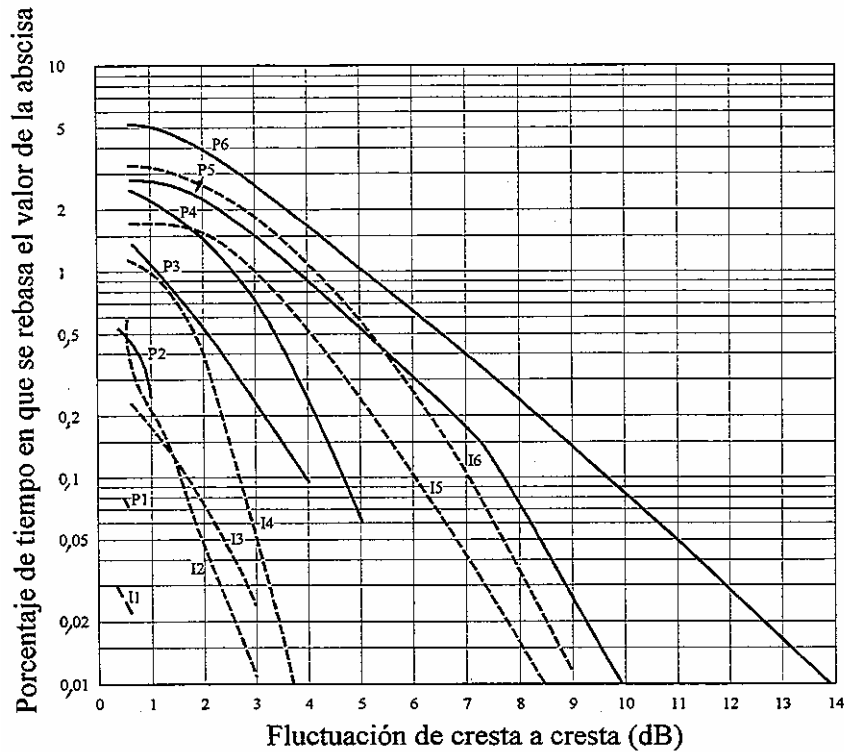


FIGURA 7.6

Pautas de aparición del centelleo a 1,5 GHz en el ecuador magnético

7.4.3 Modelos de centelleo

Para establecer modelos del fenómeno del centelleo es preciso conocer los mecanismos físicos que generan estas irregularidades [Goodman y Aarons, 1990]. Sin embargo, los conocimientos actuales sobre las mismas no proporcionan base suficiente para elaborar un modelo integral. Se ha sugerido que las irregularidades de la capa F difusa son responsables del centelleo. Esas irregularidades son fundamentalmente fenómenos de las horas nocturnas que aparecen en la región F. En función de los emplazamientos latitudinales, la aparición de la capa F difusa tiene tipos distintivos relacionados con las variaciones estacionales y las actividades magnéticas. Teniendo en cuenta que dicha capa se ha estudiado constantemente desde principios de los años treinta y que se dispone de un enorme volumen de datos, los radiofísicos han tratado de establecer modelos empíricos para predecir los centelleos basados en modelos de la capa F difusa. Recientemente, se ha elaborado un modelo basado en numerosas observaciones de la propagación efectuadas desde satélite, en particular en las observaciones realizadas en el experimento de satélite en banda ancha DNA [Secan y otros, 1996]. Gracias a esas aportaciones, los modelos tienen en cuenta la actividad geográfica, estacional, diurna y solar, así como la dependencia respecto a la actividad magnética. Se ha observado la pertinencia de esos modelos para predecir los centelleos en ondas decimétricas. A continuación se indican los elementos esenciales de tales modelos.



Las curvas *P* se refieren al ángulo de elevación de 20° apuntando a un satélite síncrono que gira hacia el Este, mientras que las curvas *I* se refieren a un ángulo de elevación de 30° que apunta a un satélite síncrono que gira hacia el Oeste.

Curva	Periodo	Gama de manchas solares
I1,P1	marzo de 1975-1976	10-15
I2,P2	junio de 1976-1977	12-26
I3,P3	marzo de 1977-1978	20-70
I4,P4	octubre de 1977-1978	44-110
I5,P5	noviembre de 1978-1979	110-160
I6,P6	junio de 1979-1980	153-165

FIGURA 7.7

Estadísticas anuales del centelleo ionosférico en 4 GHz observadas en la estación terrena de Hong Kong (curvas I1, P1, I3-I6, P3-P6) y la estación terrena de Taipei (curvas P2 e I2)

Los datos disponibles de observaciones a largo plazo forman la base para establecer los modelos. En la figura 7.7 figura un ejemplo típico del trayecto ionosférico ecuatorial en 4 GHz [Fang y Pontes, 1981]. Se dan para dos enlaces las estadísticas de aparición anual de la fluctuación de amplitud de cresta a cresta, P_{fluc} , en decibelios. Se indican las curvas para distintos años, oscilando el número de manchas solares entre 10 y 165. Para el cálculo del balance de enlace, P_{fluc} se relaciona con la pérdida de nivel de la señal L_p mediante la siguiente fórmula:

$$L_p = \frac{1}{\sqrt{2}} P_{fluc} \tag{7.6}$$

7.5 Conclusiones

Para resumir, el cuadro 7.4 contiene una estimación de los valores máximos para los efectos ionosféricos en una frecuencia de 1 GHz. Se supone que el contenido electrónico cenital total de la ionosfera es una columna de 10^{18} electrones/m². También se supone un ángulo de elevación de unos 30°. Los valores dados corresponden a la transversal unidireccional de las ondas a través de la ionosfera.

CUADRO 7.4

Efectos ionosféricos máximos estimados en 1 GHz para ángulos de elevación de 30° aproximadamente, transversal unidireccional

Efecto	Magnitud	Dependencia con la frecuencia
Rotación de Faraday	108°	$1/f^2$
Retardo de propagación	0,25 μs	$1/f^2$
Refracción	< 0,17 miliradianes	$1/f^2$
Variación en la dirección de llegada	0,2 min de arco	$1/f^2$
Absorción (absorción por el casquete polar)	0,04 dB	$-1/f^2$
Absorción (auroral + absorción por el casquete polar)	0,05 dB	$-1/f^2$
Absorción (latitud media)	< 0,01 dB	$1/f^2$
Dispersión	0-4 ns/MHz	$1/f^3$
Centelleo	Véase el punto 7.4	Véase el punto 7.4

Gracias al rápido avance de las técnicas de comunicaciones e informática, ya no es apropiado el enfoque convencional de desglose de la degradación de la propagación en efectos físicos como la rotación de Faraday, el retardo de grupo y el centelleo. La propagación de las ondas en la ionosfera es un fenómeno complejo, que se manifiesta de distinto modo para los diferentes tipos de sistemas. Por ejemplo, el nivel de desvanecimiento es un tema fundamental para los sistemas de comunicaciones de escaso margen al determinar la disponibilidad del enlace; el retardo en exceso es un problema muy importante para los sistemas de navegación a la hora de determinar la distancia y el emplazamiento; la despolarización preocupa a los sistemas de teledetección, que utilizan los retornos en polarización doble para identificar el objetivo; la propiedad no estacionaria reviste una importancia básica en los sistemas de seguimiento y vigilancia, que tienen el requisito de establecer correctamente el tiempo de parada al efectuar el barrido a través del espacio; y la dispersión en volumen común es un asunto clave para los sistemas de interferencia-antiinterferencia, que deben ser capaces de controlar el nivel de interferencia deseada y no deseada. Por consiguiente, la propagación sólo puede tratarse convenientemente con una referencia adecuada a la tecnología de comunicaciones e informática del sistema que se ha de utilizar.

REFERENCIAS PARA EL CAPÍTULO 7

- AARONS, J. [1982] Global Morphology of ionospheric scintillations, *Proc. IEEE*, Vol. 70, 360-378.
- AARONS, J. [1993] The longitudinal morphology of equatorial F-layer irregularities relevant to their occurrence, *Space Science Reviews*, Vol. 63, 209-243.
- BAILEY, D.K. [1964] Polar cap absorption. *Planet and Space Sci.*, Vol. 12, 495-541.
- BASU, S. , MACKENZIE, E. y BASU, S. [1988] Ionospheric constraints on VHF/UHF communications links during solar maximum and minimum periods, *Radio Sci.*, Vol. 23, 363-378.
- BENT, R.B. y otros. [1981] The development of a highly-successful worldwide empirical ionospheric model and its use in certain aspects of space communications and worldwide total content investigation, *Effects of the Ionosphere on Space Systems and Communications*, ed. by T.M. Goodman, Naval Research Lab., Washington, D.C. 20375, United States Government Printing Office Stock No. 008-051-00064-0.
- BRIGGS, B.H. y PARKIN, I.A. [1963] On the variation of radio star and satellite scintillations with zenith angle. *J. Atmos Terr Phys.*, Vol. 25, 334-365.
- DAVIES, K. [1980] Recent progress in satellite radio beacon studies with particular emphasis on the ATS-6 radio beacon experiment, *Space Science Review*, 25, 357-430.
- DAVIES, K. [1990] *Ionospheric Radio*. IEE Electromagnetic Waves Series 31, Peter Peregrinus Ltd.
- FANG, D.J. y LIU, C.H. [1987] Propagation, Chapter 29, in *Antenna Handbook*, Y.T. Lo and S.W. Lee, editors, Van Nostrand Reinhold, Nueva York.
- FANG, D.J. y PONTES, M.S. [1981] 4/6 GHz ionospheric scintillation measurements during the peak of sunspot cycle 21. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 11, 2, 293-320.
- GOODMAN, J.M. y AARONS, J. [1990] Ionospheric effects on a modern electronic system, *Proc. IEEE* Vol. 78, 512-528.
- HARGREAVES, J.K. y COWLEY, F.C. [1967] Studies of auroral space absorption at three magnetic latitudes. *Planet and Space Sci.*, Vol 15, 1571-1585.
- HOPPE, U.-P., OFSTAD, A.E. y VAN EYKEN, A.P. [1991] Scintillations in trans-ionospheric radio signals: studying their cause with EISCAT and the NAVSTAR GPS satellites, *1991 Nordic Society for Space Research Conference Proceedings*, Danish Meteorological Institute Scientific Report 93-1, 123.
- MAWIRA, A. [1990] Slant path 30 to 12.5 GHz copolar phase difference, first results from measurements using the OLYMPUS satellite, *Electronics Letters*, Vol. 26, 15, 1138-1139.
- MILLMAN, G.H. y OLSEN, K.A. [1980] Ionospheric dispersion effects on wideband transmissions, *AGARD Conf Proc* No 284, Propagation Effects in Space/Earth Paths, 26-1 to 26-12.

- SECAN, J.A., BUSSEY, R.M., FREMOUW, E.J. y BASU, S. [1996] High-latitude upgrade to the WBMOD ionospheric scintillation model, *Proc. Ionospheric Effects Symposium*, 7-9 de mayo.
- SOICHER, H. y GORMAN, F.J. [1985] Seasonal and day-to-day variability of total electron content at mid-latitudes near solar maximum, *Radio Science*, vol 20, 383-387.
- YEH, K.C. y LIU, C.H. [1982] Radiowave scintillations in the ionosphere, *Proc. IEEE*, Vol. 70, 324-360.

CAPÍTULO 8

REFLEXIONES EN LA SUPERFICIE Y EFECTOS AMBIENTALES LOCALES (DE INTERÉS PARTICULAR PARA LOS SISTEMAS MÓVILES POR SATÉLITE)

8.1 Introducción

Las reflexiones en la superficie y los efectos ambientales locales son consideraciones importantes para las estaciones terrenas terminales que utilizan antenas con anchura de haz muy amplia, tales como los terminales de comunicaciones normalmente utilizados en los servicios de comunicaciones móviles por satélite. Tales efectos generalmente tienden a degradar la calidad de funcionamiento de un enlace de comunicaciones, aunque ocasionalmente también pueden observarse mejoras en la señal.

Las reflexiones en la superficie se producen en las proximidades inmediatas del terminal o son provocadas por reflectores que se encuentran a una cierta distancia tales como montañas y grandes estructuras artificiales. Las señales reflejadas pueden interferir a la señal directa procedente del satélite y dar lugar a unos niveles inaceptables de degradación de la señal. Además del desvanecimiento, las degradaciones de la señal incluyen la interferencia entre símbolos causada por duplicaciones retardadas.

Como efectos ambientales locales pueden citarse el apantallamiento y el bloqueo producidos por los objetos y la vegetación próximos a la estación terrena terminal. Otro factor que afecta a los enlaces de comunicaciones son las emisiones de radiofrecuencia procedentes de fuentes de ruido en el entorno local. Estas fuentes incluyen las de ruido de banda ancha, tales como los equipos eléctricos y vehículos de motor, y las emisiones fuera de banda procedentes de transmisores de gran potencia, tales como los radares.

La influencia de las degradaciones depende de la aplicación específica. Por ejemplo, en el caso de enlaces típicos de sistemas del servicio móvil terrestre por satélite (SMTS), diversas mediciones [Butterworth, 1984] y análisis teóricos (véase el ejemplo que figura en el punto 8.2.6) indican que la componente de reflexión especular normalmente es despreciable para ángulos de elevación del trayecto superiores a 20°. Sin embargo, en los terminales portátiles, las reflexiones especulares pueden ser muy importantes pues la baja directividad de la antena aumenta las posibilidades de que se produzcan efectos por reflexión especular significativos.

En el diseño de los enlaces de los sistemas del servicio móvil por satélite (SMS), la reflexión por desvanecimiento multitrayecto en combinación con el posible apantallamiento y bloqueo de la señal directa procedente del satélite constituye, normalmente, la degradación principal del sistema. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que para frecuencias por debajo de unos pocos GHz, los efectos de la propagación ionosférica (Capítulo 7) pueden ser muy importantes y en frecuencias por encima de unos pocos GHz, los efectos troposféricos (Capítulos 3-6) puede que no sean despreciables.

8.2 Efectos de la superficie de la Tierra

La predicción de las degradaciones en la propagación causadas por reflexiones en la superficie terrestre y en objetos situados sobre la misma (edificios, vegetación) es difícil debido a que los diversos tipos de degradación son numerosos y complejos y, a menudo, no pueden cuantificarse con facilidad (por ejemplo, el grado de apantallamiento en los enlaces del SMTS generalmente no puede

especificarse con precisión). Por consiguiente, los modelos de predicción de la degradación para situaciones complicadas (especialmente para enlaces del SMTS) suelen ser fundamentalmente empíricos y algunos modelos analíticos, como los utilizados para predecir los desvanecimientos por reflexión en la superficie del mar (punto 8.2.2) tienen zonas limitadas de aplicación. No obstante, las características básicas de las reflexiones en la superficie y los efectos resultantes sobre la propagación de las señales pueden determinarse mediante la teoría general de reflexiones en la superficie, como se indica a continuación.

8.2.1 Reflexión en la Tierra

8.2.1.1 Reflexión especular en una Tierra plana

El coeficiente de reflexión, R_0 , en una superficie plana viene dado por la expresión:

$$R_0 = \frac{\text{sen}\varphi - \sqrt{C}}{\text{sen}\varphi + \sqrt{C}} \quad (8.1)$$

siendo φ el ángulo de incidencia rasante y

$$C = \eta - \cos^2 \varphi \quad \text{en caso de polarización horizontal}$$

$$C = (\eta - \cos^2 \varphi) / \eta^2 \quad \text{en caso de polarización vertical}$$

con

$$\eta = \varepsilon_r(f) - j60\lambda\sigma(f)$$

donde:

$\varepsilon_r(f)$: constante dieléctrica relativa de la superficie para la frecuencia f

$\sigma(f)$: conductividad de la superficie para la frecuencia f (S/m) y

λ : longitud de onda en el espacio libre (m).

Esta expresión se representa en la figura 8.1 en función del ángulo de incidencia rasante a distintas frecuencias y para dos juegos de valores para $\varepsilon_r(f)$ y $\sigma(f)$ correspondientes respectivamente a mar y tierra [Hall, 1979] (véase también la Recomendación UIT-R P.527 sobre las características eléctricas de diversos tipos de superficies terrestres). El ángulo en que el coeficiente de reflexión con polarización vertical es mínimo se denomina ángulo de Brewster. Este ángulo, φ_p , es aproximadamente igual a $\text{sen}^{-1}(1/\sqrt{|\eta|})$.

El coeficiente de reflexión especular, en el caso de polarización vertical, es igual o inferior al coeficiente de la polarización horizontal. Por consiguiente, la polarización de la onda reflejada será diferente de la polarización de la onda incidente si la polarización incidente no es puramente horizontal o puramente vertical. Por ejemplo, una onda incidente con polarización circular queda polarizada elípticamente después de la reflexión. Asimismo, cuando el ángulo de incidencia rasante es mayor que el ángulo de Brewster se invierte el sentido de la rotación.

El cálculo de la amplitud y la polarización de la onda reflejada suele realizarse descomponiendo la onda incidente en sus componentes horizontal y vertical y calculando luego la amplitud y fase de cada componente de la onda reflejada mediante la ecuación (8.1).

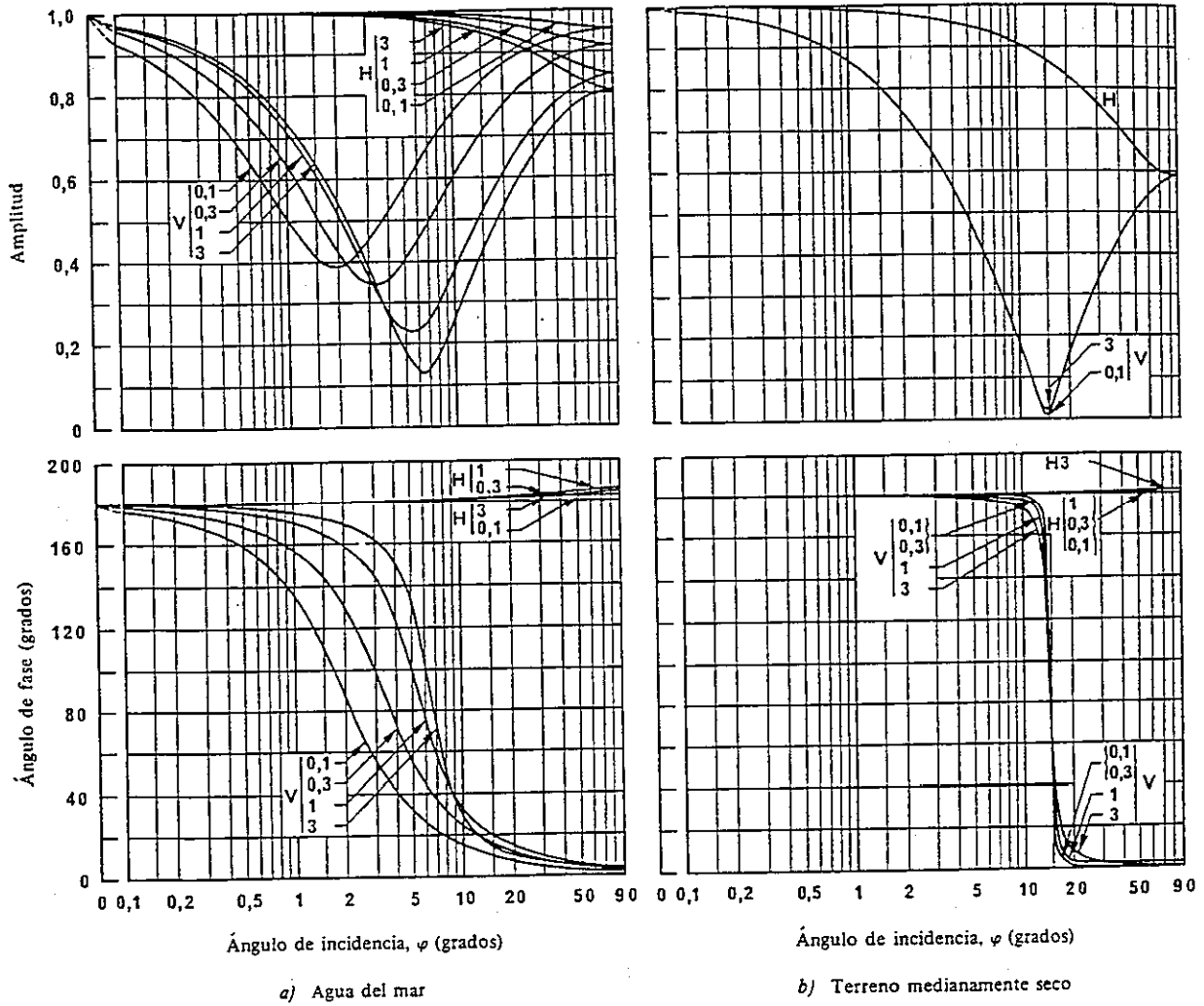


FIGURA 8.1

Amplitud y fase del coeficiente de reflexión en una superficie terrestre plana, en función del ángulo de incidencia rasante, φ , con polarización vertical (V) y horizontal (H)

Las frecuencias se indican en GHz.

NOTA - Las características correspondientes a las superficies de agua del mar y terreno medianamente seco se dan en la Recomendación UIT-R P.527.

8.2.1.2 Reflexión especular en una Tierra esférica lisa

Una señal reflejada en una Tierra esférica lisa, según se puede ver en la figura 8.2, se denomina señal con reflexión especular porque el ángulo de incidencia rasante, φ , es igual al ángulo de reflexión. La amplitud de la señal reflejada es igual a la amplitud de la señal incidente multiplicada por el módulo del coeficiente de reflexión R . La fase de la señal reflejada es la suma del cambio de fase debido a la reflexión, más el debido a la diferencia de longitud de los trayectos de la señal directa y de la señal reflejada.

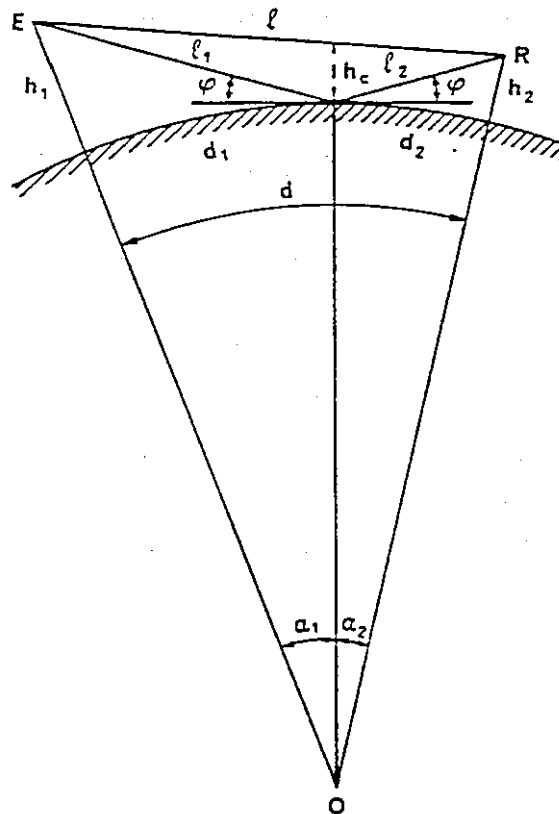


FIGURA 8.2

Elementos geométricos de la reflexión en una Tierra esférica

El análisis de la reflexión en una superficie requiere la determinación del punto geométrico de reflexión especular situado a cierta distancia, d_1 , de uno de los terminales. Esta determinación no es fácil y una solución exacta sólo existe para una superficie terrestre llana. Se dispone de soluciones aproximadas para distancias angulares pequeñas en el caso de terminales situados cerca de la superficie terrestre y para distancias muy grandes entre terminales, como sucede con una estación terrena terminal y un satélite geostacionario [Boithias, 1987].

Para trayectos Tierra-espacio l y l_1 son casi paralelos por las grandes distancias que intervienen. En este caso:

$$d_1 \approx h \cot \theta \quad (8.2)$$

$$\Delta \approx 2h \operatorname{sen}\theta \quad (8.3)$$

$$\varphi \approx \theta + \frac{h}{a_e + h} \operatorname{cotg}\theta \text{ radianes} \quad (8.4)$$

siendo θ el ángulo de elevación del satélite, h la altura de la estación terrena por encima de la superficie terrestre y a_e el radio efectivo de la Tierra.

8.2.1.3 Factor de divergencia

Cuando los rayos se reflejan especularmente en una superficie esférica, hay una reducción efectiva del coeficiente de reflexión que es en realidad un efecto geométrico debido a la divergencia de los rayos. Este efecto se recoge escribiendo el coeficiente de reflexión en una Tierra esférica lisa de la siguiente manera:

$$R = D R_0 \quad (8.5)$$

donde R_0 es el coeficiente de reflexión en una superficie plana de la ecuación (8.1) y D es un factor de divergencia.

El factor de divergencia en los trayectos Tierra-espacio puede adoptar la forma:

$$D = \left[1 + \frac{2h \operatorname{tg}E}{a_e \operatorname{sen}\varphi} \right]^{-1/2} \quad (8.6)$$

La ecuación (8.6) tiene un valor de ≈ 1 con ángulos de elevación superiores a 5° y una altura del terminal inferior a 2 km.

En una Tierra esférica lisa, el mecanismo de reflexión puede asimilarse a la reflexión de un solo rayo incidente en un solo punto geométrico. Sin embargo, la superficie total contribuye a la señal reflejada, y la mayor contribución proviene de la superficie de las zonas de Fresnel próximas del punto de reflexión geométrico.

El coeficiente de reflexión efectivo de una Tierra esférica, incluidos los efectos de divergencia y reflexión parcial, es:

$$R = FDR_0 \quad (8.7)$$

donde F es el coeficiente de reflexión parcial. En teoría, F puede tomar un valor entre 0 y 2; en la práctica, en la mayoría de los casos toma un valor entre 0,1 y 1,2.

8.2.1.4 Reflexión en superficies rugosas

En muchos casos prácticos, la superficie de la Tierra no es lisa. La reflexión de las señales radioeléctricas en superficies rugosas ha sido ampliamente estudiada [Beckmann y Spizzichino, 1963], pero la complejidad del problema ha impedido hallar fórmulas técnicas que describan completamente el mecanismo de reflexión.

Una fórmula útil es la definición cuantitativa del criterio de rugosidad de Rayleigh, que viene dado por:

$$g = 4\pi(S_h / \lambda) \operatorname{sen}\varphi \quad (8.8)$$

donde:

S_h : desviación típica de la altura de la superficie en torno al valor medio local dentro de la primera zona de Fresnel;

λ : longitud de onda en el espacio libre; y

φ : ángulo de incidencia rasante medido en relación con una tangente a la superficie.

En general, una superficie se puede considerar lisa cuando $g < 0,3$. Cuando la superficie es rugosa, la señal reflejada tiene dos componentes: una componente especular, de fase igual a la de la señal incidente, y una componente difusa, que fluctúa en amplitud y fase según una distribución de Rayleigh.

8.2.1.4.1 Coeficiente de reflexión especular para superficies rugosas

La componente especular se debe a una reflexión coherente, en el plano de incidencia, desde las zonas de Fresnel próximas del punto de reflexión geométrica y se puede describir por medio de un coeficiente de reflexión $R_s = \rho_s R$ donde ρ_s es un factor de reducción dependiente del modelo. Para superficies ligeramente rugosas con una distribución de altura aleatoria:

$$\rho_s = \exp(-g^2 / 2) \quad (8.9)$$

En superficies muy rugosas, la ecuación (8.9) tiende a subestimar ρ_s . Los modelos teóricos en los que se tienen en cuenta múltiples reflexiones [DeSanto, 1981] concuerdan con los datos experimentales, pero requieren para el cálculo técnicas de integración numérica.

Una derivación ulterior de ρ_s [Miller y otros, 1984] apunta la posibilidad de obtener una mejor estimación de esta cantidad mediante la expresión:

$$\rho_s = \exp(-g^2 / 2) I_0(g^2 / 2) \quad (8.10)$$

donde I_0 es la función Bessel modificada de orden cero. Con esta expresión, se obtiene una buena concordancia de los coeficientes de reflexión medidos en la superficie del mar.

8.2.1.4.2 Amplitud del coeficiente de reflexión difusa

La componente difusa de la señal reflejada se debe a la dispersión por una vasta zona y la contribución principal procede de regiones alejadas de la primera zona de Fresnel. La región que contribuye a la dispersión difusa se conoce con el nombre de "superficie reluciente". Las señales se dispersan desde estas superficies sin seguir ninguna dirección preferente. Es posible definir el coeficiente de reflexión difusa de la siguiente manera:

$$R_d = \rho_d |R| \quad (8.11)$$

donde ρ_d es un coeficiente que depende sólo de las irregularidades de la superficie.

No se ha encontrado una expresión simple para ρ_d cuyo valor en una superficie terrestre llana es de cero. Su valor máximo corresponde a superficies muy rugosas y su límite superior depende de la directividad de la antena y de la naturaleza del terreno. En el caso de antenas de poca directividad y sobre terreno llano o mar, el valor se sitúa entre 0,2 (-14 dB) y 0,4 (-8 dB) y el valor más probable es de 0,35 con superficies muy rugosas. En los casos en que la superficie reluciente no está plenamente iluminada, debido a que las antenas tienen una gran directividad o a la presencia de una pantalla o cuando la vegetación causa una importante absorción en la superficie ρ_d es inferior a 0,2 y puede ser insignificante.

Las mediciones experimentales y los análisis teóricos indican que la componente difusa es estadísticamente aleatoria con una distribución de Rayleigh.

8.2.1.4.3 Campo reflejado total

La figura 8.3 ilustra los factores de reducción especular y difusa medidos en una superficie marina [Beard, 1961]. En la figura se ha representado también la curva correspondiente a la ecuación (8.9). El campo total encima de una superficie reflejante es el resultado del campo directo, la componente especular coherente y la componente difusa aleatoria. El campo resultante sigue la distribución de Nakagami-Rice. Si se da por supuesto que la potencia total dispersada hacia delante es constante, la relación:

$$\langle \rho_s \rangle^2 + \langle \rho_d \rangle^2 = \text{constante} \quad (8.12)$$

en la que $\langle \rho \rangle$ indica los valores eficaces, puede ser útil para calcular el campo reflejado. En el cálculo de este campo resultante hay que tener también en cuenta la directividad de la antena.

La reflexión en superficies irregulares ha sido objeto de diversos estudios teóricos. Desgraciadamente, no se cuenta en la actualidad con fórmulas técnicas adecuadas para calcular el desvanecimiento por trayectos múltiples originado por ese tipo de reflexión. Se ha avanzado mucho en lo que se refiere a las superficies marinas a frecuencias próximas a 1,5 GHz [Karasawa y Shiokawa, 1984a]. Es probable que la metodología elaborada para esa frecuencia sea válida para frecuencias inferiores y podría servir de base para hacerla extensiva a frecuencias superiores.

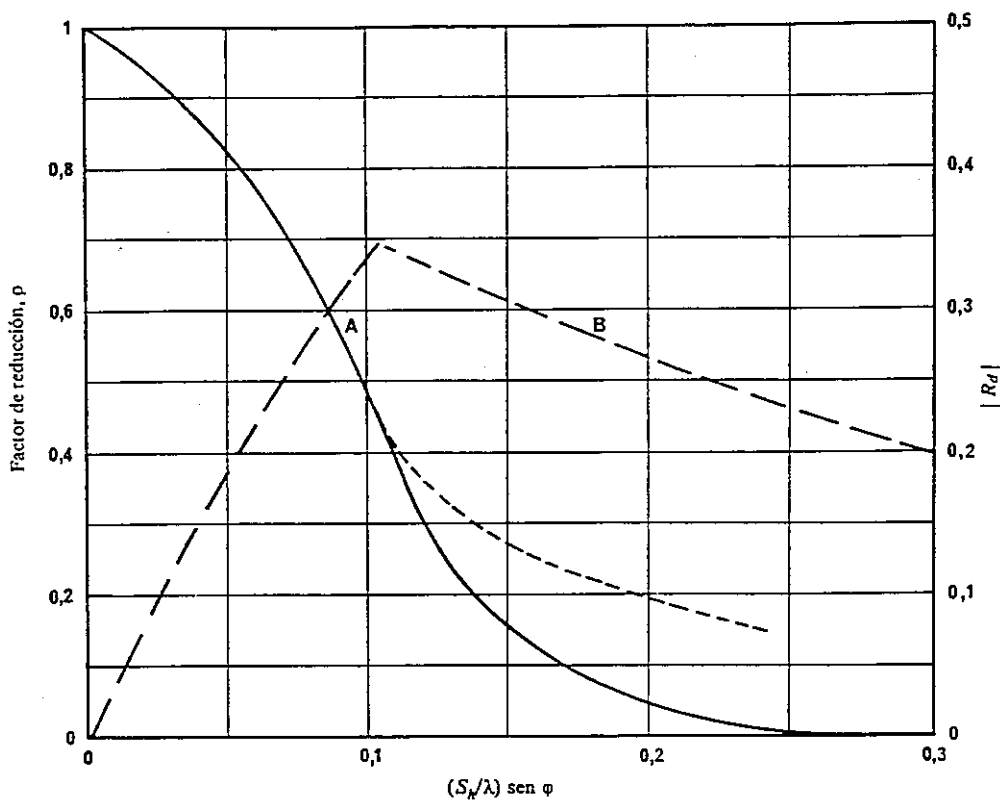


FIGURA 8.3

Reflexión producida por superficies rugosas

La curva A corresponde a la componente especular. La línea de trazo continuo se ha calculado mediante la ecuación (8.9). La línea de trazos representa datos experimentales.

La curva B es un coeficiente de reflexión difusa medido experimentalmente, R_d .

8.2.1.5 Multitrayecto debido a la reflexión

Debido a la existencia de los fenómenos de reflexión en la superficie descritos anteriormente, las señales pueden llegar al receptor procedente de diversas fuentes aparentes. La combinación de la señal directa y las ondas con reflexión especular y difusa provoca un desvanecimiento de la señal en el receptor. El desvanecimiento por trayecto múltiple resultante, en ocasiones en combinación con diversos niveles de apantallamiento y bloqueo de los componentes de visibilidad directa, puede dar lugar a que la potencia de la señal recibida sufra un desvanecimiento importante y rápido en los terminales móviles y, por lo tanto, normalmente es el tipo de degradación dominante en los servicios móviles por satélite.

En el punto 5 de la Recomendación UIT-R P.681 aparecen modelos de trayectos múltiples para los enlaces del SMMS y en el punto 4 de la Recomendación UIT-R P.680 y el punto 4 de la Recomendación UIT-R P.682, respectivamente, se indican modelos para el multitrayecto por reflexión en la superficie del mar en los enlaces del SMMS y el SMAS. Además, el desvanecimiento multitrayecto se considera en los puntos 8.2.2 y 8.2.4 del presente Manual.

8.2.2 Desvanecimiento debido a la reflexión en la superficie del mar

8.2.2.1 Consideraciones generales

El desvanecimiento multitrayecto debido a la reflexión marítima está producido por la interferencia entre las ondas radioeléctricas directa y reflejada. Las ondas reflejadas están formadas por un componente coherente (reflexión especular) y un componente incoherente (reflexión difusa), que fluctúa con el tiempo debido al movimiento de las olas del mar. El componente coherente predomina en condiciones de mar en calma y en ángulos de elevación bajos, mientras que el componente incoherente se vuelve significativo en condiciones de mar encrespado. Si se conoce la intensidad del componente coherente y la varianza del componente incoherente, la distribución acumulativa en el tiempo de la intensidad de la señal puede determinarse por datos estadísticos [Beckmann y Spizzichino, 1963; Karasawa y Shiokawa, 1984a].

Por razones históricas, el primer modelo de predicción para el desvanecimiento multitrayecto debido a la reflexión marítima fue elaborado para la aplicación a los sistemas móviles marítimos por satélite (SMMS) en frecuencias cercanas a 1,5 GHz. Aunque el mecanismo de la reflexión marítima es común a los SMMS y los sistemas móviles aeronáuticos por satélite (SMAS), se prevé que las características de desvanecimiento de los SMAS sean distintas a las de los SMMS, porque la velocidad y altitud de las aeronaves son mucho mayores que las de los barcos.

En la presente sección se facilita información básica sobre los modelos que permiten predecir el desvanecimiento multitrayecto debido a la reflexión marítima en las Recomendaciones UIT-R P.680 (para los SMMS) y UIT-R P.682 (para los SMAS).

8.2.2.2 Características de la superficie del mar

El parámetro más corriente utilizado para describir el estado del mar es la altura significativa de las olas, H , definida como el valor medio de la altura cresta a depresión de la tercera parte más alta de todas las olas. Empíricamente, H guarda relación con la altura cuadrática media, h_0 mediante la ecuación [Kinsman, 1965]:

$$H = 4 h_0 \quad (8.13)$$

El cuadro 8.1 presenta algunas estadísticas de la aparición de alturas significativas de las olas en distintas regiones del mundo [Long, 1975]. El valor medio de la altura significativa de las olas, medido desde el satélite "GEOS-III", varió entre 2 m y 4 m en función de la estación del año y la latitud [Sandowell y Agreen, 1984].

CUADRO 8.1

Frecuencia relativa (en %) de las alturas significativas de las olas en distintas regiones del mundo [Long, 1975]

Región	Altura de las olas (m)					
	0-0.9	0.9-1.2	1.2-2.1	2.1-3.6	3.6-6	>6
Atlántico Norte, entre Terranova e Inglaterra	20	20	20	15	10	15
Atlántico medio ecuatorial	20	30	25	15	5	5
Atlántico Sur, latitud de Argentina meridional	10	20	20	20	15	10
Pacífico Norte, latitud de Oregón y parte meridional de la península de Alaska	25	20	20	15	10	10
Pacífico oriental ecuatorial	25	35	25	10	5	5
Franja de vientos del Oeste del Pacífico meridional, latitud de Chile meridional	5	20	20	20	15	15
Océano Indico Norte, estación de monzones del noreste	55	25	10	5	0	0
Océano Indico Norte, estación de monzones del sudoeste	15	15	25	20	15	10
Océano Indico Sur, entre Madagascar y Australia septentrional	35	25	20	15	5	5
Franja de vientos del Oeste del Océano Indico meridional en la ruta entre el Cabo de Buena Esperanza y Australia meridional	10	20	20	20	15	15
Promedio de todas las regiones	22	23	20.5	15.5	9.5	9.0

Para calcular el componente incoherente del multitrayecto se necesita un modelo de β_0 , distribución en pendiente de las facetas de la superficie del mar. Por lo general, la distribución en pendiente debe ponderarse conforme a la frecuencia radioeléctrica, ya que no todas las pendientes contribuyen a la dispersión en una frecuencia dada. La superficie del mar puede considerarse como una superficie rugosa compuesta consistente en olas aproximadamente periódicas de gran escala, sobre las que se superponen olas de menor escala.

En 1,5 GHz pueden despreciarse las olas de menor escala y el valor cuadrático medio de las pendientes de la superficie del mar parece hallarse entre 0,04 y 0,07 en el caso de una altura de la ola inferior a 4 m [Karasawa y Shiokawa, 1984a]. La figura 8.4 muestra la relación entre la pendiente cuadrática media y la altura de la ola. En otros lugares se han observado valores de la pendiente cuadrática media tan altos como 0,2 [Departamento de Transporte de Estados Unidos de América, 1973].

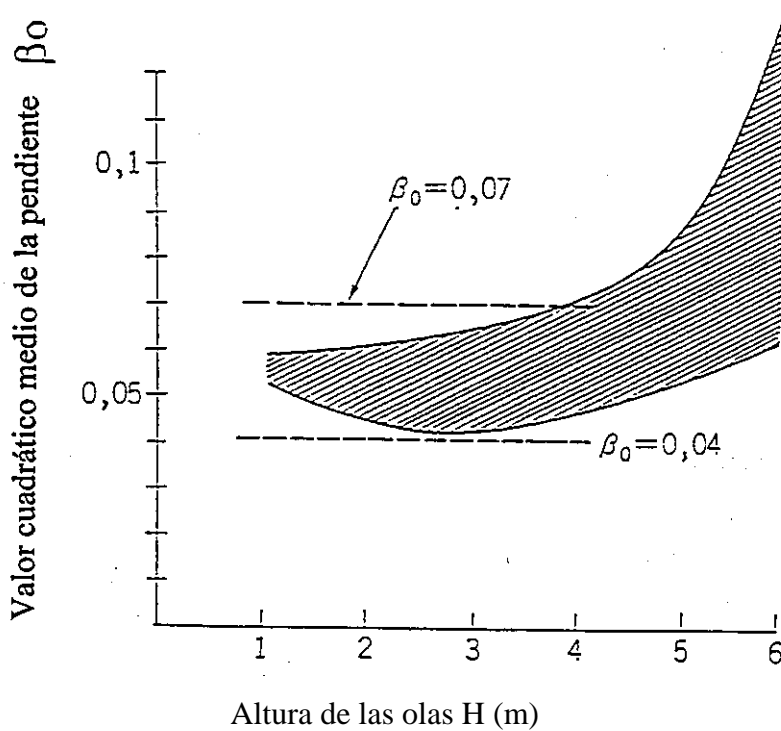


FIGURA 8.4

Relación entre la altura de las olas H y el valor cuadrático medio de la pendiente β_0
[Karasawa y Shiokawa, 1984a]

8.2.2.3 Modelo de cálculo del desvanecimiento

8.2.2.3.1 Base teórica

La amplitud del componente reflejado coherente, E_r^C , en relación con la señal directa aparece dada por la ecuación:

$$E_r^C = |R|g_r \exp\left(\frac{-u^2}{2}\right) I_0\left(\frac{u^2}{2}\right) \quad (8.14)$$

con

$$u = \frac{(4\pi h_0 \text{sen}\theta_i)}{\lambda} \quad (8.15)$$

en donde:

- R : coeficiente de reflexión especular del mar;
- g_r : ganancia de antena hacia el punto especular, en relación con el eje de puntería;
- I_0 : función de Bessel modificada de primera clase y de orden cero;
- λ : longitud de onda de la señal radioeléctrica;
- θ_i : ángulo de elevación.

La profundidad de desvanecimiento máxima, $A_{máx}^C$, se produce cuando la señal multitrayecto coherente está en antifase con la señal directa, y aparece dada por la ecuación:

$$A_{máx}^C = -20 \log(1 - E_r^C) \quad \text{dB} \quad (8.16)$$

El valor disminuye rápidamente con el aumento de la altura de la ola, el ángulo de elevación y la frecuencia. En la práctica, debido al movimiento vertical de la antena del buque en relación con la altura media de la superficie marítima, rara vez aparecerá el valor máximo de desvanecimiento.

El componente incoherente es aleatorio, tanto en amplitud como en fase, pues se origina de un amplio número de facetas causantes de reflexión de las olas del mar. La amplitud de este componente tiene una distribución Rayleigh y la fase posee una distribución uniforme. La varianza de la amplitud aparece dada por la ecuación:

$$V(E_r^I) = \frac{1}{4\pi} \iint_{\text{superficie del mar}} |R|^2 g_r^2 \sigma \cotg\theta_i d\theta_s d\phi_s \quad (8.17)$$

en donde

- σ : sección transversal media de dispersión por unidad superficial de una superficie encrespada perfectamente conductora, exenta de dispersión múltiple, dependiente de las irregularidades de la superficie del mar (esto es h_0 y β_0 descritas en el punto 8.2.2.2) y de las polarizaciones de la antena transmisora y receptora;
- θ_s, ϕ_s : ángulos de dispersión indicados en la figura 8.5.

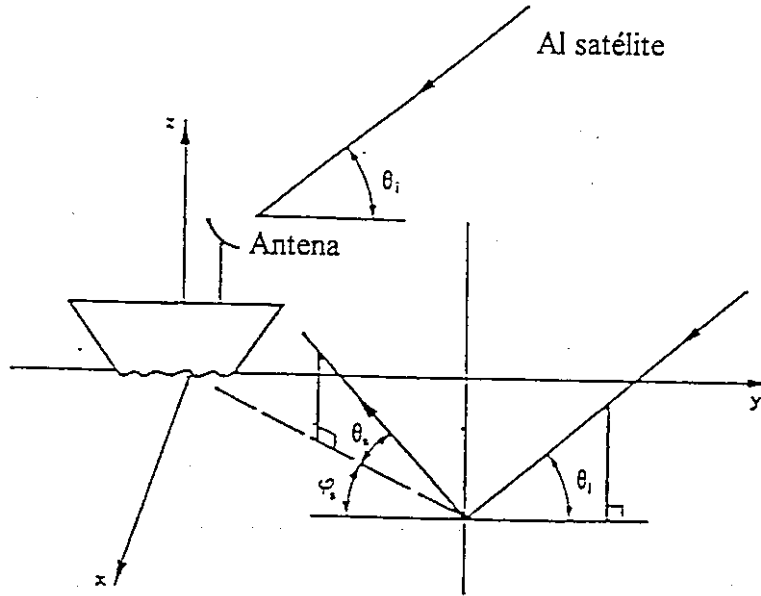


FIGURA 8.5

Geometría de la dispersión producida por la superficie marítima

La amplitud de la señal resultante en el buque terminal tiene una distribución de Nakagami-Rice al ser la suma del componente directo de la onda y de los componentes coherente e incoherente de reflexión (véase la Recomendación UIT-R P.1057). La distribución acumulativa del desvanecimiento depende de las intensidades de la señal coherente a incoherente. Por ejemplo, en el caso de estado encrespado del mar en 1,5 GHz, la reflexión coherente del mar es prácticamente inexistente y la señal coherente está compuesta sólo por el componente directo [Karasawa y Shiokawa, 1984a; Dissanayake y otros, 1985]. Por consiguiente, el desvanecimiento está determinado por la relación portadora a multitrayecto (C/M), esto es, la relación de potencia de la señal directa y del componente multitrayecto provocado por las reflexiones incoherentes.

Si se suma $A_{m\acute{a}x}^C$ y $A^I(p)$ (desvanecimiento de la señal debido al componente incoherente en función del porcentaje de tiempo, p), se obtiene una estimación práctica de los efectos combinados de desvanecimiento de la señal multitrayecto coherente e incoherente para el estado del mar:

$$A^T(p) = A_{m\acute{a}x}^C + A^I(p) \tag{8.18}$$

El valor máximo del desvanecimiento debido al componente coherente no se producirá constantemente a causa del movimiento vertical de la antena del buque en relación con la altura media de la superficie del mar y, por lo tanto, la estimación obtenida utilizando la ecuación (8.18) parece dar el valor del caso más desfavorable. En la práctica, para ángulos de elevación bajos (menos de 10°) alrededor de las frecuencias de la banda L, el desvanecimiento máximo se produce cuando la altura significativa de la ola está comprendida entre 1,5 y 3 m, en cuyo caso el componente reflejado coherente es despreciable. La dependencia de la profundidad del desvanecimiento respecto a la altura de las olas en esta gama es relativamente pequeña [Karasawa y Shiokawa, 1984a; Ohmori y otros, 1985; Karasawa y otros, 1990a]. (Véase también el punto 8.3.3 en el cual se describe el movimiento de la antena para los SMMS.)

La figura 8.6 muestra la profundidad del desvanecimiento no rebasado durante el 99% del tiempo y la correspondiente relación portadora a multitrayecto, C/M , para la polarización circular en 1,5 GHz, con alturas significativas de las olas de 1,5 m a 3 m.

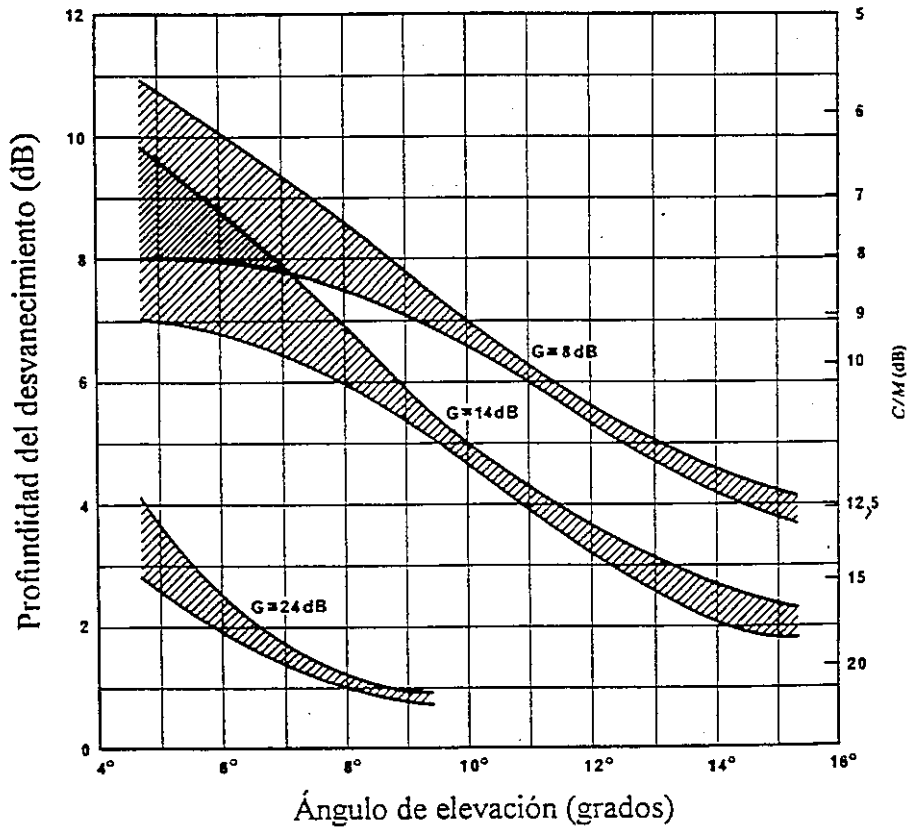


FIGURA 8.6

Profundidad del desvanecimiento no rebasada durante el 99% del tiempo y relación correspondiente portadora a multitrayecto, C/M

Polarización circular en 1,5 GHz en condiciones de alturas significativas de la ola de 1,5 a 3 m (el componente reflejado coherente es despreciable)

Dado que el modelo teórico no es apropiado para los cálculos de ingeniería utilizando un pequeño ordenador, es útil disponer de modelos de predicción más sencillos para el cálculo aproximado del desvanecimiento o la interferencia. Esos métodos sencillos para predecir la potencia multitrayecto o profundidad del desvanecimiento han sido elaborados por Sandrin y Fang [1986] y Karasawa y Shiokawa [1988] para los SMMS y por Karasawa y otros [1990b] para los SMAS. Se facilita información detallada en el punto siguiente.

8.2.2.3.2 Método de predicción sencillo de la profundidad del desvanecimiento para SMMS y SMAS

Según análisis teóricos y resultados experimentales [Karasawa y Shiokawa, 1984a; 1988; Karasawa y otros, 1990b], la mayoría de los trayectos Tierra-espacio con ángulos de elevación bajos en 1,5 GHz satisfacen aproximadamente la siguiente ley de conservación de la energía:

$$[\text{potencia del componente coherente}] + [\text{potencia media del componente incoherente}] \cong \text{constante} \quad (8.19)$$

Si se satisface la anterior relación, la potencia incoherente máxima puede estimarse con facilidad mediante el cálculo de la potencia coherente en $u = 0$. Para obtener una estimación más exacta se necesitan pequeñas modificaciones de algunos parámetros. Se ha adoptado el procedimiento modificado en las Recomendaciones UIT-R P.680 para SMMS y UIT-R P.682 para SMAS. En esas Recomendaciones se indican las condiciones aplicables de los métodos de cálculo.

La figura 8.7 presenta un diagrama de dispersión de la profundidad del desvanecimiento (esto es, desvanecimiento para el 99% del tiempo en relación con el observado en el 50%) en el caso de los SMMS entre los datos medidos y los valores previstos obtenidos con el método de cálculo sencillo en las mismas condiciones. En la figura, F_{dp2} son los valores obtenidos con el método establecido en la Recomendación UIT-R P.680, mientras que F_{dp1} son los valores calculados con el procedimiento alternativo introduciendo $\theta = 2,0 \theta_i$ en la etapa 1 del método de predicción en lugar de $\theta = 1,5 \theta_i$. Es evidente que los valores obtenidos con los métodos concuerdan con los valores experimentales, aunque los métodos sean bastante aproximados.

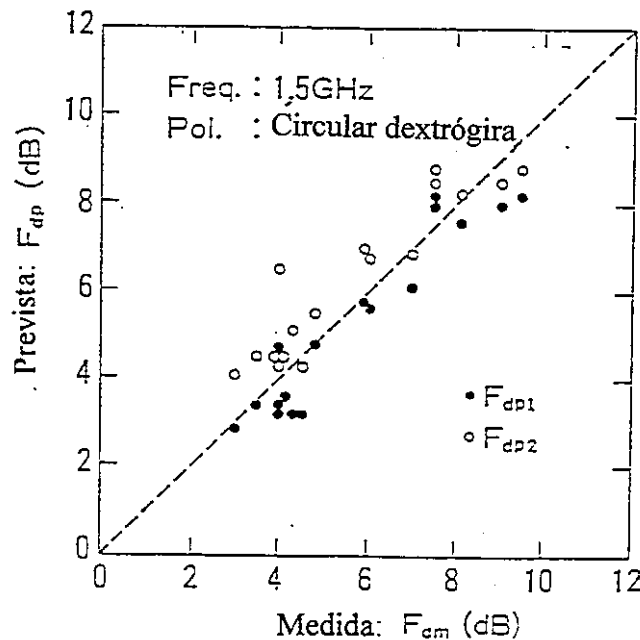


FIGURA 8.7

Diagrama de dispersión de las profundidades del desvanecimiento medidas y previstas en los SMMS

La figura 8.8 muestra la dependencia respecto a la altura del desvanecimiento de la señal para el 99% del tiempo, obtenida a partir de mediciones realizadas desde un helicóptero [Karasawa y otros, 1990b], junto con los valores calculados por el método de estimación sencillo de la Recomendación UIT-R P.682 (línea continua) y el modelo teórico (región sombreada) [Yasunaga y otros, 1986]. La figura permite observar que el método de predicción sencillo corresponde adecuadamente al modelo teórico y los datos medidos, incluso en el caso de los SMAS.

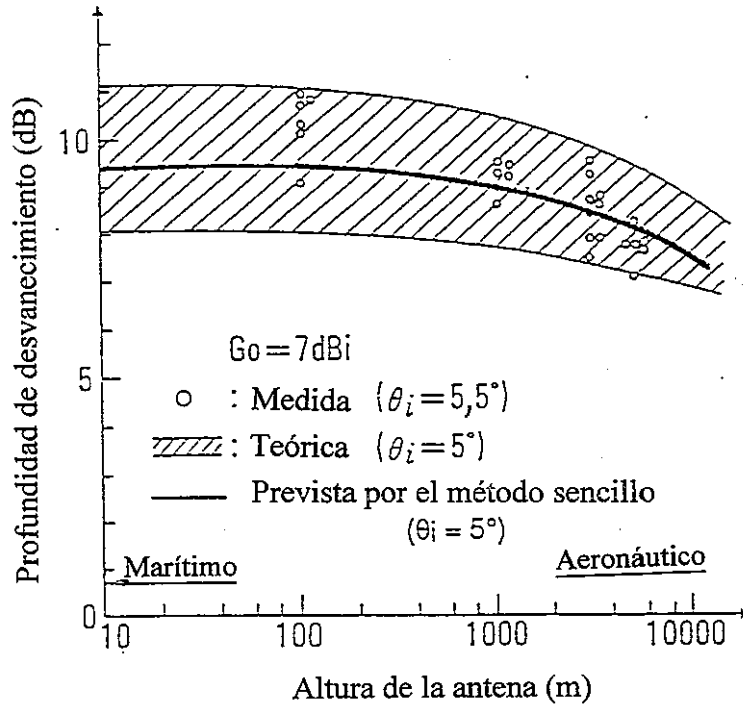


FIGURA 8.8

Profundidad del desvanecimiento no rebasada durante el 99% del tiempo en función de la altura de la antena

8.2.2.3.3 Espectro del desvanecimiento

En el diseño de sistemas, en particular en los sistemas de transmisión digital, es importante no sólo calcular la profundidad del desvanecimiento sino conocer también las propiedades de las variaciones temporales, como el espectro de potencia de la frecuencia y las estadísticas de duración del desvanecimiento multitrayecto.

En el caso de los SMMS, Karasawa y Shiokawa [1984b] han realizado un análisis teórico. Se tomaron en cuenta los parámetros que afectan al espectro, como la altura de las olas, la dirección de la onda, la dirección y velocidad del buque, el ángulo de elevación del trayecto y las variaciones de la altura de la antena debidas al movimiento del buque (balanceo y cabeceo).

Por lo general, la anchura de banda espectral aumenta con el incremento de la altura de las olas, el ángulo de elevación, la velocidad del buque y el movimiento relativo de la antena a bordo del buque. La dependencia de la forma del espectro respecto a la polarización y a la ganancia de la antena es habitualmente muy pequeña. La forma espectral calculada sigue generalmente la ley exponencial f^{-4} .

La figura 8.9 muestra los espectros de potencia calculados del desvanecimiento multirrayecto en 1,5 GHz para tres casos que tienen una anchura de banda espectral y en que la altura de las olas es de 5 m y el ángulo de elevación es de 10°. La anchura espectral de -10 dB es de unos a 5 Hz cuando se recibe a bordo de un buque con movimientos amplios.

Basándose en el modelo se da en la Recomendación UIT-R P.680 la gama probable de la anchura de banda espectral de -10 dB en un desvanecimiento en 1,5 GHz.

Teniendo en cuenta que la velocidad de las aeronaves es mucho más alta que la de los buques, la velocidad de fluctuación del desvanecimiento multirrayecto en los SMAS es mucho mayor que en los SMMS, en función del ángulo de elevación del vuelo θ_p medido desde el plano horizontal. La anchura de banda espectral calculada de -10 dB va de unos 20 Hz a 200 Hz para ángulos de elevación de 5° a 20°, ángulos de elevación del vuelo de 0° a 5° y una velocidad de 1 000 km/h [Karasawa y otros, 1990b].

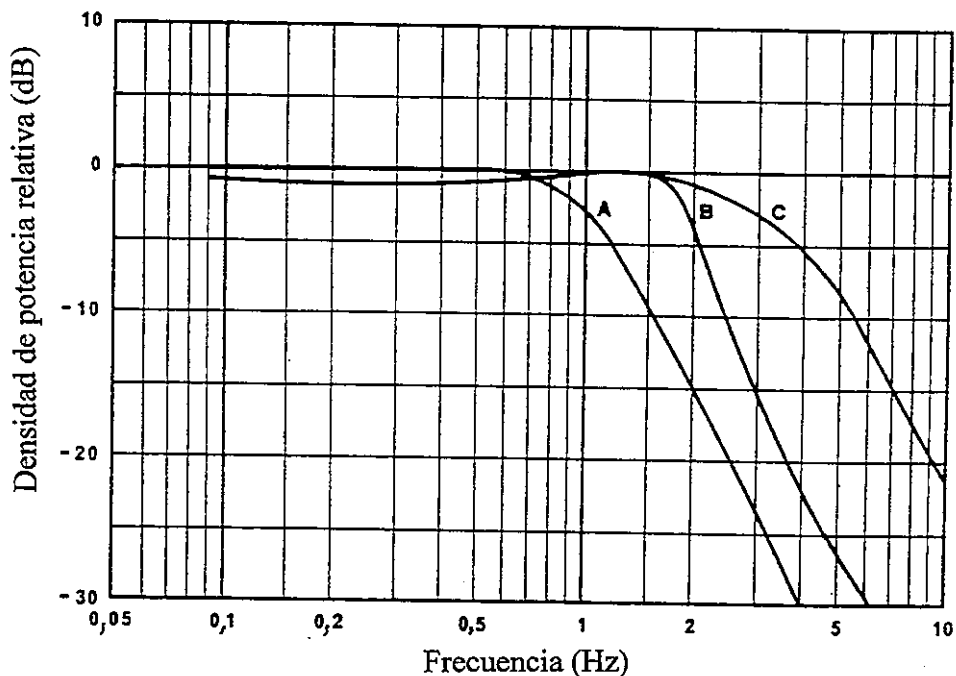


FIGURA 8.9

Espectros de potencia del desvanecimiento multirrayecto en 1,5 GHz causado por la reflexión de la superficie marítima para tres casos con amplia anchura de banda espectral

(altura de las olas: 5 m; ángulo de elevación: 10°; ganancia de la antena: 13 dBi)

Caso A: recepción sobre una plataforma fija

Caso B: recepción a bordo de un buque sin movimiento

Caso C: recepción a bordo de un buque con amplios movimientos (balanceo y cabeceo)

8.2.2.3.4 Estadísticas de la duración del desvanecimiento

Karasawa y Shiokawa [1987] analizaron las estadísticas de duración del desvanecimiento en los entornos SMMS basándose en los datos medidos. La duración del desvanecimiento T_D y el intervalo de aparición del desvanecimiento T_I se definen como se indica en la figura 8.7. Los valores medios de T_D y T_I (esto es $\langle T_D \rangle$ y $\langle T_I \rangle$) dependen no sólo de la velocidad de fluctuación sino también del nivel umbral en función del porcentaje de tiempo.

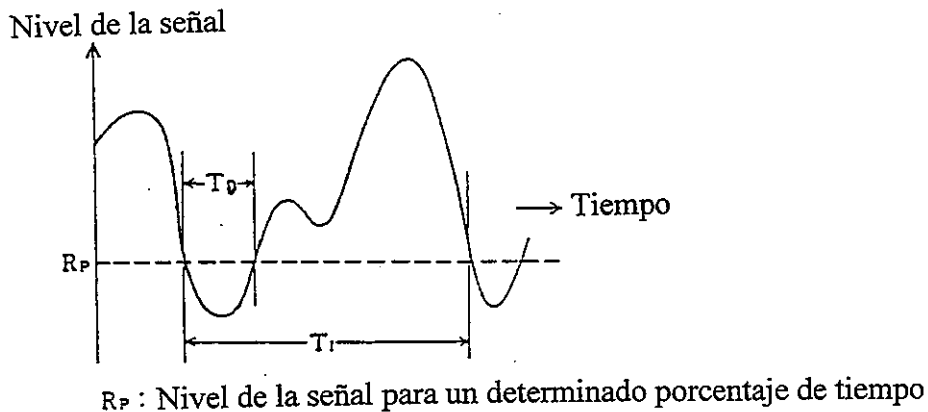


FIGURA 8.10

Definición de la duración del desvanecimiento e intervalo de aparición del desvanecimiento

En teoría pueden calcularse $\langle T_D \rangle$ y $\langle T_I \rangle$ a partir del espectro de potencia de la frecuencia cuando el proceso obedece a las estadísticas gaussianas [Papoulis, 1965]. Este enfoque teórico es todavía válido en el caso del desvanecimiento multitrayecto debido a la reflexión en la superficie marítima [Karasawa y Shiokawa, 1987]. En la figura 8.11 se comparan el valor medido de $\langle T_D \rangle$ y $\langle T_I \rangle$ y los valores estimados a partir de sus espectros de potencia. La función de distribución de las probabilidades de T_D y T_I está cercana a las distribuciones exponenciales.

Tomando en cuenta la relación entre la duración del desvanecimiento y el espectro de potencia se elaboró el método de predicción simplificado de la Recomendación UIT-R P.680 para $\langle T_D \rangle$ y $\langle T_I \rangle$ en términos de la anchura de banda espectral de -10 dB. Los errores de predicción del método están dentro del 10% en la mayoría de los casos en los entornos del SMMS [Karasawa y Shiokawa, 1987].

8.2.2.3.5 Correlación entre la anchura de banda y la tasa irreducible de errores

En el caso de los entornos de SMAS, la diferencia de trayecto entre las ondas directa y reflejada por el mar es bastante amplia y el desvanecimiento multitrayecto puede tener características selectivas de la frecuencia. Se calculó la correlación de la anchura de banda en función de la altura de la antena [Karasawa y otros, 1990b], que aparece en la Recomendación UIT-R P.682.

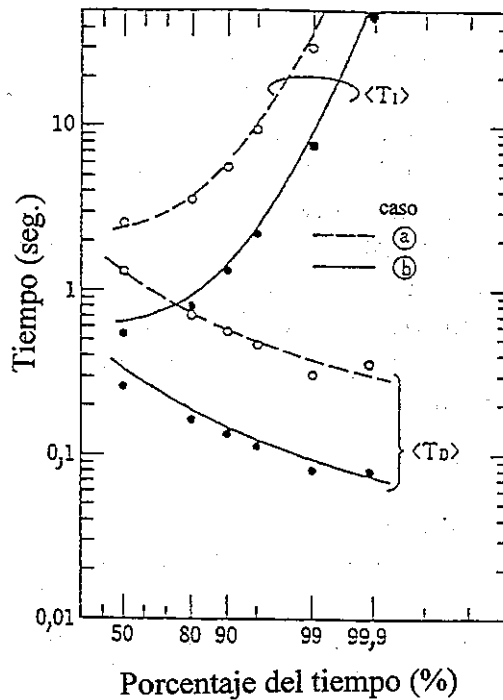


FIGURA 8.11

Duración media del desvanecimiento e intervalo de aparición del desvanecimiento en función del nivel umbral correspondiente a porcentajes de tiempo entre el 50% y el 99,9%

(Los puntos y los círculos son datos medidos; las dos curvas se han estimado a partir de cada espectro de potencia)

Caso	Ángulo de elevación	Altura de las olas	Velocidad del buque	Balaneo del buque
a	5°	0,5 m	11 nudos	1°
b	10°	3 m	11 nudos	5°

El desvanecimiento multirayecto selectivo de la frecuencia en los canales móviles da lugar a una tasa irreducible de errores en la que los aumentos de la potencia de la señal directa no reducen la tasa de errores correspondiente. Se han realizado simulaciones de un enlace SMAS con una señal modulada de desfasamiento mínimo codificada diferencialmente [Davarian, 1988]. Se estableció un modelo de la señal combinada (directa más reflejada difusamente) con estadísticas de Rice y la señal reflejada fue retardada convenientemente respecto a la señal directa. Se detectó diferencialmente la señal combinada y se procedió a realizar la prueba de la proporción de bits erróneos.

Los resultados muestran que la tasa irreducible de errores es superior en un canal SMAS que en un canal SMTS. El aumento del tiempo del componente multirayecto provoca un incremento de la tasa irreducible de errores. Otros estudios [Hagenauer y otros, 1987; Korn, 1989] apoyan esos resultados y muestran que un aumento en la potencia o el tiempo de multirayecto incrementará la tasa irreducible de errores.

8.2.3 Apantallamiento y bloqueo

El apantallamiento y bloqueo de las señales debidos a los árboles, los edificios y otras estructuras naturales y artificiales puede considerarse la degradación de la señal más importante en los sistemas de comunicaciones móviles por satélite. Las señales recibidas detrás de los árboles tendrán una componente de visibilidad directa reducida, debido a la absorción experimentada al atravesar el follaje del árbol, así como una componente aleatoria causada por la dispersión de energía producida en el árbol. Cuando el trayecto de la señal resulta bloqueado por una estructura sólida tal como un edificio, la componente directa no existe o es muy pequeña y el enlace de comunicación sólo puede establecerse a través de los trayectos de la señal difractada o reflejada. Para definir los límites de cobertura, la calidad del servicio y los márgenes del enlace es necesario determinar detalladamente los diversos efectos del apantallamiento.

8.2.3.1 Apantallamiento por árboles

La atenuación debida a los árboles se produce por la absorción de las hojas y el bloqueo causado por los troncos y las ramas. La absorción provocada por las hojas depende del tipo y tamaño de las mismas y de su contenido de agua. El bloqueo debido a los troncos depende fundamentalmente de su tamaño. Además de la atenuación de la señal directa, los árboles también pueden provocar la aparición de una componente incoherente debido a las señales reflejadas y difractadas por las superficies del árbol. El cuadro 8.2 extraído de Goldhirsh y Vogel [1992] muestra los niveles de atenuación medidos para diversos tipos de árboles a la frecuencia de 870 MHz. Se han observado unos niveles de atenuación de cresta superiores a 15 dB.

CUADRO 8.2
Resumen de la atenuación producida por un solo árbol a 870 MHz
[Goldhirsh y Vogel, 1992]

Tipo de árbol	Atenuación (dB)		Coeficiente de atenuación (dB/m)	
	Valor más elevado	Valor medio	Valor más elevado	Valor medio
Roble podado	13,9	11,1	1,0	0,8
Peral	18,4	10,6	1,7	1,0
Acebo	19,9	12,1	2,3	1,2
Arce noruego	10,8	10,0	3,5	3,2
Roble-pino	8,4	6,3	0,85	0,6
Pinar	18,4	13,1	1,85	1,3
Sasafrás	17,2	15,4	1,3	1,1
Sasafrás	16,1	9,8	3,2	1,9
Pino escocés	7,7	6,6	0,9	0,7
Pino blanco	12,1	10,6	1,5	1,2
Media general	14,3	10,6	1,8	1,3

Este cuadro muestra que el coeficiente medio de atenuación puede variar a lo largo de una amplia gama de valores; el valor medio global es de 1,3 dB/m. Basándose en estos valores medios se ha determinado una ley de proporcionalidad con la frecuencia para el coeficiente de atenuación [Goldhirsh y Vogel, 1992]:

$$\alpha_1 = \alpha_0 \sqrt{\frac{f_1}{f_0}} \text{ dB / m} \quad (8.20)$$

siendo α_0 y α_1 los coeficientes de atenuación a las frecuencias f_0 y f_1 , respectivamente.

En diversos textos figuran otras relaciones empíricas que proporcionan el coeficiente de atenuación en función de la frecuencia. A continuación se indican tres de ellas:

Benzair y otros, [1991]: $\alpha = 0,79 f^{0,61}$ (8.21a)

Weissberger y Hauber, [1982]: $\alpha = 0,45 f^{0,284}$ (8.21b)

Simmons, [1981]: $\alpha = 1,102 + 1,48 \log f$ (8.21c)

donde f es la frecuencia en GHz.

La ecuación (8.21a) se basa en un conjunto de mediciones multifrecuencia (1 a 4 GHz a intervalos de 500 MHz) realizadas tras un solo árbol con hojas. La ecuación (8.21b) se deriva de mediciones efectuadas en zonas forestales a lo largo de una gama de frecuencias comprendida entre 100 MHz y 3,2 GHz y la ecuación (8.21c) se basa en mediciones efectuadas de 9,5 a 90 GHz.

En la figura 8.12 se representan las relaciones empíricas anteriores junto con la relación indicada en la ecuación (8.20) en la que se supone que α_0 toma un valor de 1,3 dB/m a 870 MHz. Puede observarse que las cuatro curvas difieren bastante entre sí. Las disparidades pueden deberse al método de medición utilizado, a los tipos de árboles que intervinieron en las mediciones y al tamaño limitado de la muestra utilizada en cada investigación. La gama de variación de α a 1,5 GHz va de 0,5 a 1,7 dB/m y sigue con bastante aproximación las tendencias identificadas en el cuadro 8.2. Las mediciones efectuadas con receptores móviles en entornos rurales se encuentran en la gama de variaciones señalada. Teniendo en cuenta los resultados disponibles, parece adecuado considerar un coeficiente de atenuación medio de aproximadamente 1,0 dB/m para las frecuencias de la banda L.

Estos resultados se aplican a los árboles llenos de hojas. Los árboles desnudos producen atenuaciones inferiores y la disminución en la atenuación parece ser proporcional a la atenuación total experimentada cuando el árbol tiene todas sus hojas. Los factores de reducción medios determinados de forma empírica presentan valores entre 0,36 [Goldhirsh y Vogel, 1992] y 0,44 [Weissberger y Hauber, 1982].

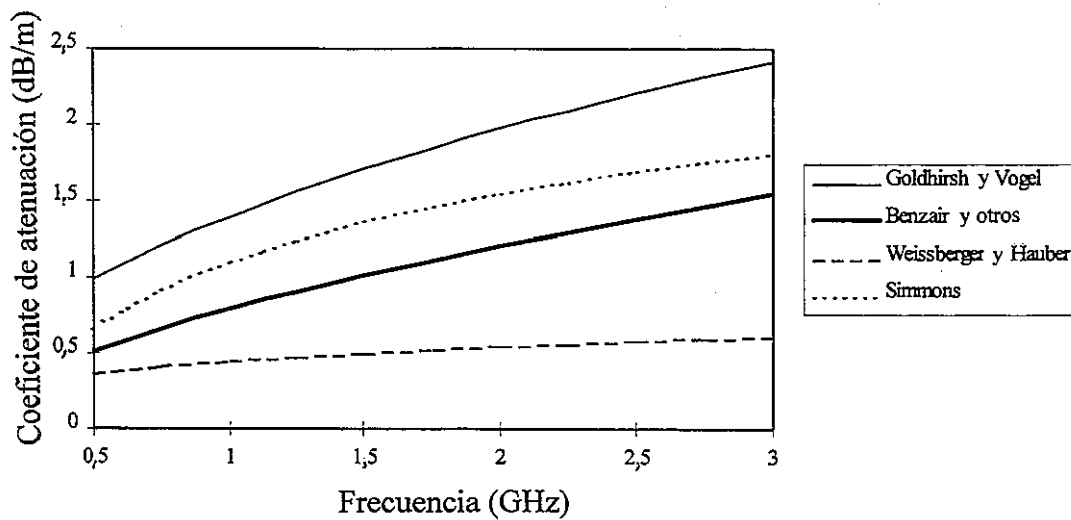


FIGURA 8.12

Comparación de varias relaciones empíricas que proporcionan un coeficiente de atenuación por árboles en función de la frecuencia

La intensidad recibida de la señal directa tras un árbol dependerá de la orientación del trayecto de la señal con respecto al árbol. La cantidad de materia absorbente a lo largo del trayecto determinará el grado de atenuación y, por consiguiente, puede considerarse por término medio que la longitud del trayecto de la señal a través del árbol es un factor fundamental para determinar el nivel de la señal. La longitud del trayecto es función del ángulo de elevación y de la distancia entre el receptor y el árbol. La atenuación media tras un árbol aislado puede calcularse como el producto del coeficiente de atenuación por la longitud del trayecto a través del árbol. La longitud del trayecto a través del follaje propiamente dicho dependerá de la forma del mismo y de la orientación del trayecto de la señal dentro del follaje. Dependiendo del tipo de árbol considerado, el follaje puede asimilarse a uno de los siguientes modelos de forma: cono, esfera, esferoide alargado o tetraedro. Para ángulos de elevación intermedios (20° a 50°) la atenuación es casi independiente de la elevación; la dependencia con la elevación pasa a ser importante únicamente en los extremos superior e inferior de la gama de ángulos de elevación. De forma alternativa, considerando la variación de la longitud del trayecto como un parámetro estadístico, pueden crearse modelos de árboles estableciendo un valor medio de la atenuación y una distribución en torno al mismo. Las componentes coherente e incoherente variarán según la posición del receptor y para distancias del orden de unas pocas longitudes de onda cabe esperar una completa descorrelación de la señal.

Por regla general, no se dispone de modelos estadísticos adecuadamente desarrollados con los que pueda caracterizarse completamente la atenuación introducida por los árboles. Varios investigadores han llevado a cabo *in situ* mediciones de la atenuación provocada por árboles aislados a frecuencias próximas a 1 GHz; al respecto pueden citarse Goldhirsh y Vogel [1987], Benzair y otros [1991] y Ulaby y otros [1990]. Algunas de las mediciones se han efectuado con antenas de baja ganancia y, por consiguiente, estos resultados pueden haber sido alterados por otros fenómenos tales como las reflexiones en la superficie. También se dispone de los resultados de algunas investigaciones sobre

la atenuación provocada por bosques de gran densidad de arbolado. (Véanse resúmenes en Weissberger y Hauber [1982] y Simmons [1981].) Además, también se han realizado mediciones con vehículos en movimiento en entornos rurales donde la principal degradación de la señal se debe al apantallamiento por árboles [Goldhirsh y Vogel, 1992; Jongejans y otros, 1986].

Las distribuciones de los valores de intensidad de la señal medidos detrás de árboles aislados han dado como resultados distribuciones normales o log-normales. Puede que sea más conveniente considerar una distribución log-normal teniendo en cuenta el proceso de aumento independiente asociado con los distintos componentes causantes de la atenuación (hojas, ramas pequeñas, ramas grandes, etc.). La distribución log-normal se define mediante dos parámetros, la media y la desviación típica, y toma la forma siguiente:

$$P(A > A_0) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln A - \ln A_m}{\sqrt{2}\sigma} \right] \quad (8.22)$$

donde A es la atenuación, $P(A > A_0)$ es la probabilidad de que la atenuación rebase el valor especificado A_0 , A_m es el valor medio de A y σ es la desviación típica de $\ln(A)$.

El valor medio de la atenuación puede determinarse a partir del coeficiente de atenuación una vez establecida la longitud media del trayecto a través del follaje del árbol. La desviación típica normalmente dependerá de la atenuación media. Sin embargo, en el caso de la atenuación producida por un solo árbol cabe esperar que esta dependencia sea más bien reducida. A partir de los datos medidos por distintas fuentes [Benzair y otros, 1991; Jongejans y otros, 1986] se deduce que la gama de valores de la desviación típica oscila aproximadamente entre 0,3 y 0,5. Suponiendo una desviación típica de 0,4, en la figura 8.13 se representa la distribución resultante para tres valores de la atenuación media: 8, 10 y 12 dB.

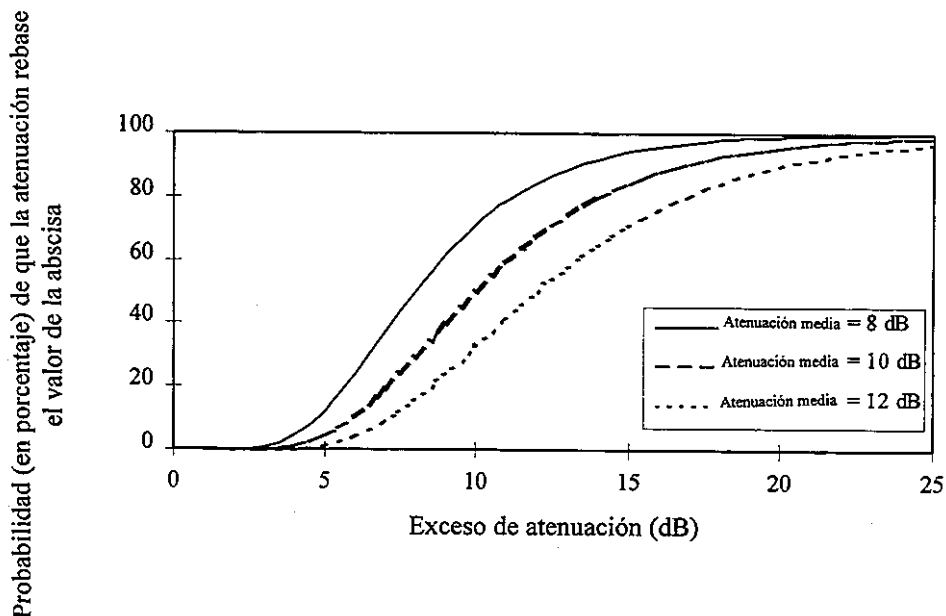


FIGURA 8.13

Probabilidad de atenuación por árboles con tres niveles de atenuación media

La señal incoherente procedente de la suma de las diversas componentes con dispersión aleatoria se caracteriza generalmente en términos de la potencia contenida en ellas comparada con la potencia de la señal directa (relación portadora/multitrayecto, C/M). Como se ha indicado antes, la componente aleatoria es bastante débil aun cuando la señal directa sufra una fuerte atenuación. Mediciones móviles llevadas a cabo en zonas rurales donde los árboles son la fuente principal de la componente incoherente parecen sugerir valores de la relación C/M superiores a 12 dB.

8.2.3.2 Apantallamiento por edificios

La recepción de la señal detrás de edificios tiene lugar principalmente por difracción y reflexión. Normalmente no existe la componente de visibilidad directa y, por consiguiente, el apantallamiento no puede definirse sin ambigüedad como en el caso de los árboles. Sin embargo, puede definirse de manera aproximada como la relación de potencias entre el nivel medio de la señal recibida y el nivel de la señal directa sin apantallar.

Las difracciones producidas por los edificios pueden estudiarse utilizando la teoría de la difracción sobre aristas, que no es rigurosamente exacta en estos casos pero ofrece una razonable estimación. En la figura 8.14 se representa la idea conceptual de los fenómenos de difracción sobre aristas; en dicha figura se muestra la intensidad de la señal relativa en las zonas apantallada e iluminada. En la figura 8.14 (a) pueden verse las pérdidas provocadas por la presencia del obstáculo en función de un parámetro adimensional v y la figura 8.14 (b) ilustra la geometría del trayecto para los casos iluminado y apantallado, a fin de calcular el parámetro v . Las siguientes fórmulas están extraídas de la Recomendación UIT-R P.526,

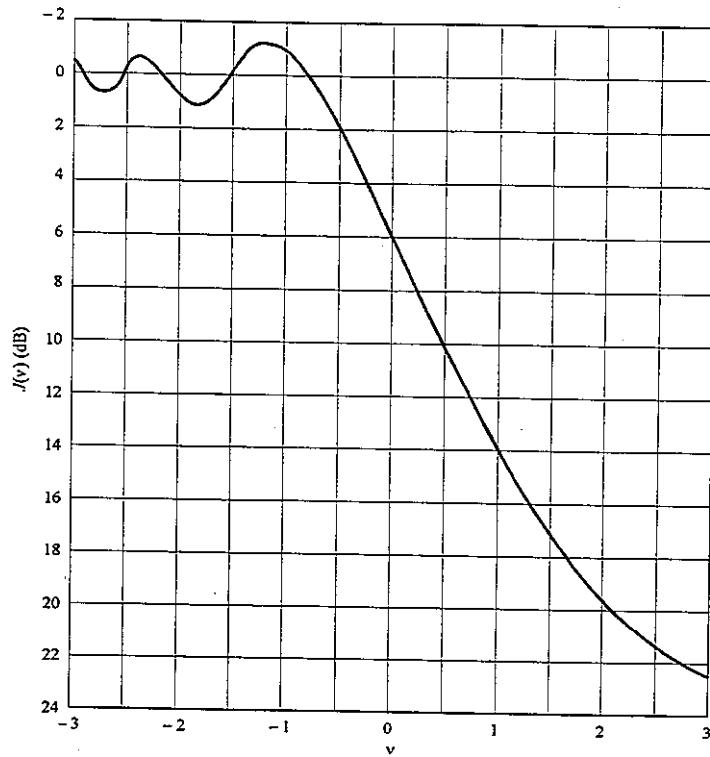
$$v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (8.23)$$

pero $d_1 \gg d_2$, por consiguiente

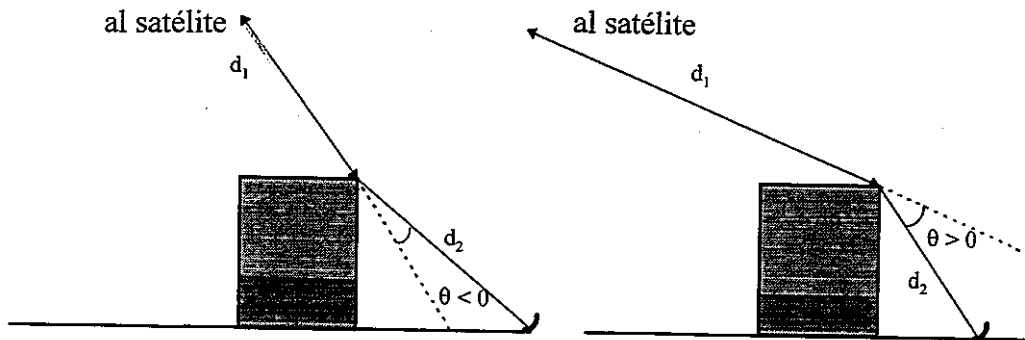
$$v \approx \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{d_2} \right)}} = \theta \sqrt{\frac{2d_2}{\lambda}} \quad (8.24)$$

La intensidad de la señal en el límite del apantallamiento es 6 dB inferior al nivel con visibilidad directa. En la región iluminada la señal experimenta fluctuaciones debidas a la interferencia entre las componentes directa y difractada. Una vez en el interior de la región apantallada las pérdidas por apantallamiento aumentan rápidamente. Una investigación experimental realizada sobre un apantallamiento por edificio [Yoshikawa y Kagohara, 1989] confirma la aplicación de la teoría de la difracción sobre aristas. Suponiendo un solo borde de difracción se determinó que la intensidad de la señal medida detrás de un edificio a diversas distancias seguía con bastante aproximación la predicción efectuada. Sin embargo, cuando el edificio es estrecho en comparación con su altura puede producirse un apantallamiento notablemente inferior al previsto por el procedimiento anterior. En la Recomendación UIT-R P.526 aparece un método para el caso de pantallas con anchura finita.

Cuando el trayecto de la señal directa se ve bloqueado por un edificio no cabe esperar que las difracciones en el edificio desempeñen un papel predominante en el establecimiento del enlace de comunicaciones, a menos que el terminal de comunicaciones se encuentre próximo al límite del apantallamiento. Sin embargo, las reflexiones pueden ser muy útiles en tales situaciones como sucede en los casos de los sistemas celulares terrenales.



(a) Pérdidas debidas a la difracción sobre aristas producida en el borde de un edificio



(b) Geometría de la difracción sobre aristas para el cálculo de v

FIGURA 8.14

La penetración en el edificio depende del tipo del material exterior utilizado para la construcción del mismo y de la situación dentro del edificio. Las pérdidas a través de la estructura externa, conocidas como pérdidas de penetración, se definen como la diferencia entre los valores medianos de los niveles de la señal medidos inmediatamente fuera del edificio a 1,5 m sobre el suelo e inmediatamente dentro del edificio a una cierta altura de referencia en el piso de interés. Mediciones llevadas a cabo a 940 MHz en una ciudad de tamaño medio de Estados Unidos de América indican que en la planta baja de un edificio de oficinas típico construido de acero, hormigón y roca, las pérdidas de penetración medias son de aproximadamente 10 dB con una desviación típica de unos 7 dB. Otro conjunto de mediciones realizadas en una gran ciudad dieron como resultados unas

pérdidas de penetración en la planta baja de 18 dB con una desviación típica de 7,7 dB [Walker, 1983]. La disminución global de las pérdidas de penetración con la altura fue de aproximadamente 1,9 dB por piso. En el cuadro 8.3 [IEEE, 1988] aparecen las pérdidas de penetración medias para varios materiales de construcción comunes. La atenuación producida por el cristal oscila entre 2 y 6 dB dependiendo del tipo de cristal; el cristal simple produce menos atenuación que el cristal coloreado o revestido con componentes metálicos.

CUADRO 8.3

Atenuación de los materiales de construcción

Material de construcción	Atenuación media (dB)	Desviación típica (dB)
Muro en bloque de hormigón de 8 pulgadas	7	1
Paredes de madera y ladrillos	3	0,5
Paredes de aluminio	2	0,5
Muros metálicos	12	4
Atenuación producida por los muebles de oficina (dB/m)	1	0,3

Las pérdidas en el interior del edificio dependen tanto de la distancia al muro exterior que bloquea el trayecto de la señal como de la disposición interior. A partir de las mediciones efectuadas se han obtenido unos coeficientes de ley exponencial con la inversa de la distancia comprendidos entre 2 y 4.

Se han realizado mediciones de la atenuación producida por edificios utilizando señales de satélite [Wells, 1977]. Se han efectuado igualmente mediciones en el interior de residencias unifamiliares en los Estados Unidos de América a 860, 1 550 y 2 596 MHz utilizando el satélite ATS-6. Las residencias utilizadas para las mediciones tenían en su mayor parte una estructura de madera siendo los exteriores de madera o material similar y el revestimiento de ladrillos. A 1 550 MHz se observó una atenuación media por edificio de 6,7 dB. En las residencias que contenían material aislante con soporte de aluminio se apreciaron niveles de atenuación mucho más elevados. La atenuación aumentó con la frecuencia a un ritmo aproximado de 1 dB/GHz. La posición de una habitación dentro de la casa tenía un efecto muy pequeño sobre el nivel de la señal recibida con una variación media de 0,6 dB. Los exteriores de ladrillo provocaron una atenuación aproximadamente 1,2 dB superior a la de los exteriores de madera. No se observó ninguna dependencia significativa con el ángulo de elevación. La polarización horizontal experimentó unos 1,8 dB más de atenuación que la polarización vertical.

En el interior de un edificio puede determinarse el nivel medio de la señal teniendo en cuenta las pérdidas de penetración y una dependencia con la inversa de la distancia dentro del edificio; una aproximación razonable puede ser la inversa del cubo de la distancia. Alternativamente, la fila correspondiente a la "atenuación producida por los muebles de oficina" del cuadro 8.3 puede utilizarse para obtener la atenuación que se produce desde el muro exterior hasta y un punto determinado dentro de una habitación. Sobre el nivel medio de la señal aparece superpuesta una componente variable que presenta una distribución de Rayleigh.

8.2.4 Desvanecimiento en el SMAS debido a la reflexión terrestre

Se realizó un experimento a bordo de un helicóptero sobre tierra que recibía señales de radiobaliza con polarización circular dextrógira (RHCP) en 1,5 GHz procedentes del satélite MARISAT situado en la región del Océano Índico en un ángulo de elevación de 10° [Karasawa y otros, 1990b]. Las profundidades del desvanecimiento medidas sobre llanuras tales como arrozales fueron bastante amplias (unos 5 dB), aproximadamente iguales a las provocadas por la reflexión marítima; las profundidades del desvanecimiento medidas sobre zonas montañosas y urbanas fueron inferiores a 2 dB. En el caso de las zonas montañosas, las ondas reflejadas eran probablemente apantalladas o difundidas por las montañas. En las zonas urbanas, los efectos de apantallamiento y difusión de las ondas reflejadas por los edificios eran también amplios. Por ese motivo, generalmente no es significativo el desvanecimiento multitrayecto reflejado por el suelo en tales casos.

En la Recomendación UIT-R P.682 se resumen los resultados de las mediciones efectuadas utilizando el satélite ATS-6 [Schroeder y otros, 1976].

8.2.5 Interferencia procedente de sistemas de satélites adyacentes

8.2.5.1 Consideraciones generales

En los sistemas móviles de comunicaciones por satélite de buques, aeronaves y automóviles, las antenas móviles pequeñas son indispensables por motivos de explotación y económicos. Como resultado se han elaborado distintos sistemas de estación terrena móvil de bajo G/T de antenas pequeñas. Sin embargo, esas antenas están sometidas a la restricción de la eficacia de utilización de la frecuencia o a la coexistencia entre dos (o más) sistemas de satélite en la misma banda de frecuencias y/o una zona de superposición en la que ambos satélites son visibles. Para realizar la coordinación entre dos sistemas distintos en la misma banda de frecuencias se requiere un modelo de evaluación de la interferencia muy fiable que comprenda las condiciones de interferente e interferido.

Se han emprendido investigaciones en este sector, en particular en la Comisión de Estudio 8 del UIT-R. La elaboración de ese modelo es urgente para el UIT-R, considerando el número de sistemas móviles por satélite que se están desarrollando.

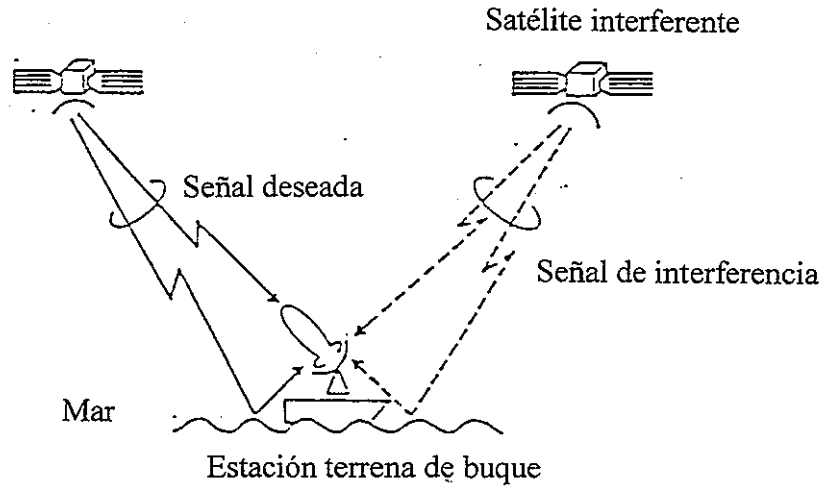
En los sistemas móviles por satélite, la señal deseada procedente del satélite y la señal interferente procedente de un satélite adyacente experimentan por separado fluctuaciones de amplitud debidas al desvanecimiento multitrayecto, que requieren un trato distinto del aplicado a los sistemas fijos por satélite. El principal requisito técnico es la formulación estadística del desvanecimiento diferencial, que es la diferencia entre las amplitudes de las dos señales.

En el punto 5 de la Recomendación UIT-R P.680 figura un método de predicción práctico para la relación señal/interferencia, en el que se tienen en cuenta el efecto del ruido térmico y de la interferencia parecida al ruido, suponiendo que las amplitudes de la señal deseada y de la señal de interferencia afectada por el desvanecimiento multitrayecto de reflexión marítima siguen las distribuciones de Nakagami-Rice. Esa situación es muy probable que se dé en los sistemas marítimos de comunicaciones por satélite.

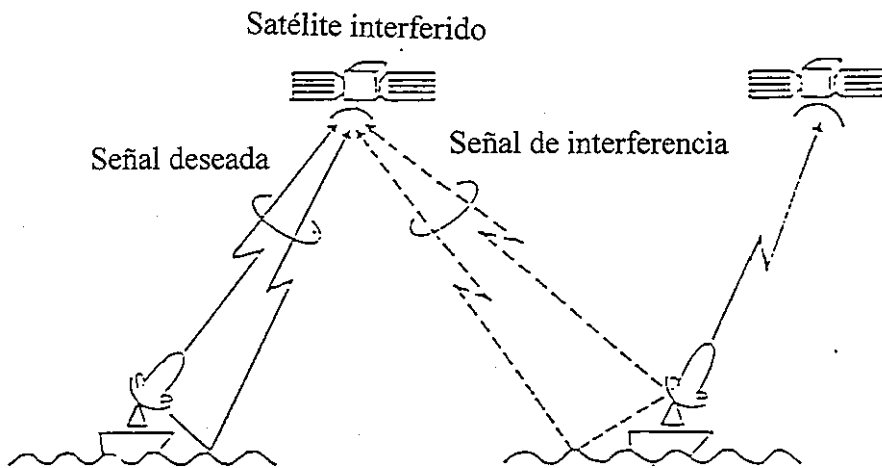
8.2.5.2 Hipótesis básicas del modelo

La figura 8.15 es un ejemplo de la interferencia entre sistemas adyacentes de satélite, en el que (a) es la "interferencia del enlace descendente" en el lado de la estación terrena móvil, y (b) es la "interferencia del enlace ascendente" en el lado del satélite.

Esto se aplica a sistemas múltiples que comparten la misma banda de frecuencias. Se supone que la interferencia causa un problema especialmente grave cuando el satélite interferente tiene un ángulo de elevación bajo visto desde el buque (figura 8.15), porque el nivel máximo de la señal de interferencia debida al desvanecimiento multitrayecto aumenta al disminuir el ángulo de elevación. Otra situación es la interferencia entre haces en un funcionamiento de múltiples haces restringidos, en donde la misma frecuencia se atribuye repetidas veces.



a) Interferencia del enlace descendente



b) Interferencia del enlace ascendente

FIGURA 8.15

Interferencia causada un sistema de satélites adyacente y procedente del mismo

Los supuestos básicos para el modelo son los siguientes [Karasawa y Yasunaga, 1991]:

- a) La amplitud de la señal deseada y de la señal de interferencia sigue las distribuciones de Nakagami-Rice, incluida una distribución de Rayleigh para la señal de interferencia. Las variaciones de amplitud de las señales deseada e interferente no guardan correlación.
- b) Para el ruido térmico (n), no hay variaciones temporales.
- c) La interferencia actúa como el ruido térmico; es decir, cuando una señal interferente y el ruido térmico están presentes simultáneamente, puede obtenerse la potencia de ruido equivalente (n_e) sumando la potencia de la interferencia (i) y la potencia del ruido térmico (esto es, $n_e = n+i$).

8.2.5.3 Precisión de la predicción

La precisión del modelo aquí presentado se evaluó por comparación con un modelo teórico estricto que satisfacía los supuestos antes enunciados [Karasawa y Yasunaga, 1991]. Para todos los casos incluidos en la siguiente gama de parámetros (D : potencia de onda directa de la señal deseada; N : potencia de ruido del sistema promediada; M : potencia multitrayecto promediada de la señal deseada; I : potencia promediada de la interferencia):

$$N/D \leq -5 \text{ dB}; M/D \leq -5 \text{ dB}; I/D \leq -10 \text{ dB}$$

la desviación máxima del valor previsto $\epsilon_{m\acute{a}x}$ para cada porcentaje de tiempo, con $\epsilon_{m\acute{a}x}$ (dB) dado por la fórmula:

$$\epsilon_{m\acute{a}x} = \text{m\acute{a}x} (| [\text{valor calculado con el m\acute{e}todo simple}] - [\text{valor estricto}] |)$$

es la siguiente:

p (%):	80	90	99	99,9	99,99
$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (dB):	0,24	0,34	0,55	0,66	0,71

El error máximo aumenta al incrementarse el porcentaje de tiempo, p . Sin embargo, en el caso habitual en el que la propia degradación de $[c/(n+i)]$; c es la potencia de la señal deseada] es muy amplia (esto es, del orden de 10 a 20 dB menos que D/N), el error es relativamente pequeño. Por otra parte, el error tiende a sesgarse hacia una estimación conservadora, lo que parece deseable para la predicción de la interferencia.

8.2.6 Ejemplo de resolución de un problema

Para ilustrar algunos de los conceptos introducidos en los puntos anteriores de este capítulo a continuación se realiza el cálculo del desvanecimiento para un sistema del SMTS. La geometría y los parámetros del enlace corresponden a una recepción a latitudes medias de las señales procedentes de un satélite geostacionario por un sistema del SMTS que funciona en condiciones de visibilidad directa. Obsérvese que los coeficientes de reflexión utilizados en el ejemplo deben obtenerse de las fuentes de referencia (como la figura 8.1 del presente Manual; véase también la Recomendación UIT-R P.527).

Parámetros del sistema:

Señal de transmisión:	1 GHz, polarización circular
Ángulo de elevación, θ :	30° (eje de puntería)
Antena móvil:	polarización circular
Ganancia de la antena (señal copolar), g_{cr} :	4 dBi para $\theta = 30^\circ$ 0 dBi para $\theta < 0^\circ$
Ganancia de la antena (señal contrapolar), g_{xr} :	-6 dBi para $\theta < 0^\circ$

Efectos ionosféricos:

Según el Capítulo 7, los efectos ionosféricos son insignificantes a latitudes medias salvo la rotación de Faraday. Como las transmisiones tienen una polarización circular, no intervendrá la rotación de Faraday (véase el punto 5.3.1).

Efectos troposféricos:

Según el Capítulo 3, los efectos de atenuación son despreciables. Según el Capítulo 6, los efectos de refracción serán despreciables para ángulos de elevación superiores a 5°.

Efectos del suelo:

En este ejemplo:

R_{cs} y R_{xs} :	coeficientes de reflexión copolar y contrapolar de una onda incidente con polarización circular en una tierra curvada;
ρ_s :	factor de rugosidad del terreno (con relación a S_h , valor cuadrático medio de las irregularidades de altura del terreno);
D :	factor de divergencia debido a la curvatura de la Tierra (igual a la unidad para todas las condiciones normales);
R_V y R_H :	coeficientes de reflexión para una tierra plana con polarizaciones vertical y horizontal, respectivamente; y
R_d :	componente de reflexión difusa con relación a la componente directa.

(Véase el punto 8.2.1 para un análisis de la reflexión en la superficie de la Tierra y definiciones de términos.) En este caso, se supone que $S_h = 0,1$ m y se utilizan coeficientes de reflexión para un terreno medio.

Como para un terminal móvil terrestre (por ejemplo, una antena instalada en un vehículo), $h = 0$, de la ecuación (8.4) se deduce que:

$$\varphi = \theta = 30^\circ$$

A partir de la ecuación (8.8) se determina el parámetro de rugosidad:

$$g = 4\pi (S_h/\lambda) \text{ sen } \varphi = 2,09$$

Componente especular:

$$R_{CS} = \rho_S D R_C; R_{XS} = \rho_S D R_X \quad (\text{de la ecuación 8.5 y la definición que figura en el punto 8.2.1.4.1})$$

$$\rho_S = \exp[-g^2/2] I_0[g^2/2] = 0,29 \quad (\text{de la ecuación 8.10})$$

$$D = 1$$

$$R_V = 0,33; R_H = -0,77 \quad (\text{de la figura 8.1, para terreno seco, con } \varphi = 30^\circ)$$

$$R_C = (R_H + R_V)/2 = (-0,77 + 0,33)/2 = -0,22$$

$$R_X = (R_H - R_V)/2 = (-0,77 - 0,33)/2 = -0,55$$

$$R_{CS} = (0,29)(1)(-0,22) = -0,064 \text{ ó } -23,9 \text{ dB} \quad \text{con respecto a la onda directa}$$

$$R_{XS} = (0,29)(1)(-0,55) = -0,160 \text{ ó } -15,9 \text{ dB} \quad \text{con respecto a la onda directa}$$

Magnitud:

Componentes directa y especular.

$$|E| = \text{suma de las componentes directa y especular}$$

$$|E| = \text{componente directa } \pm (\text{reflexiones especulares copolar + contrapolar})$$

$$|E| = \text{intensidad de campo de la componente directa } [1 \pm (\text{ganancia de la antena copolar hacia el punto de reflexión especular})(\text{coeficiente de reflexión copolar}) + (\text{ganancia de la antena contrapolar hacia el punto de reflexión especular})(\text{coeficiente de reflexión contrapolar})]$$

$$|E| = E_0 |1 \pm [g_{cr}(-60^\circ)R_{CS} + g_{xr}(-60^\circ)R_{XS}]|$$

$$|E| = E_0 |1 \pm [(0,63)(-0,064) + (0,316)(-0,16)]|$$

$$|E| = E_0 |1 \pm 0,0908|$$

o de

$$+0,75 \text{ dB a } -0,83 \text{ dB con respecto a } E_0, \text{ intensidad de campo de la señal directa.}$$

La componente especular, 20,8 dB por debajo de la componente directa (0,0908 expresada como relación), al añadirse a la onda directa produce una resultante que fluctuará 0,8 dB alrededor de la onda directa (E_0) para un ángulo de elevación de 30° . El ángulo de elevación de la señal reflejada en el suelo es superior al ángulo de Brewster y la señal tiene un sentido de polarización opuesto al de la señal directa.

Componente difusa:

Se supone que el valor medio de la magnitud de la componente difusa $\langle |R_d| \rangle \approx 0,08$ (basándose en un valor típico de $\rho_d = 0,35$ para superficies muy rugosas y $|R| = |-0,22| = 0,22$ como se ha calculado en un análisis efectuado para la componente especular anteriormente).

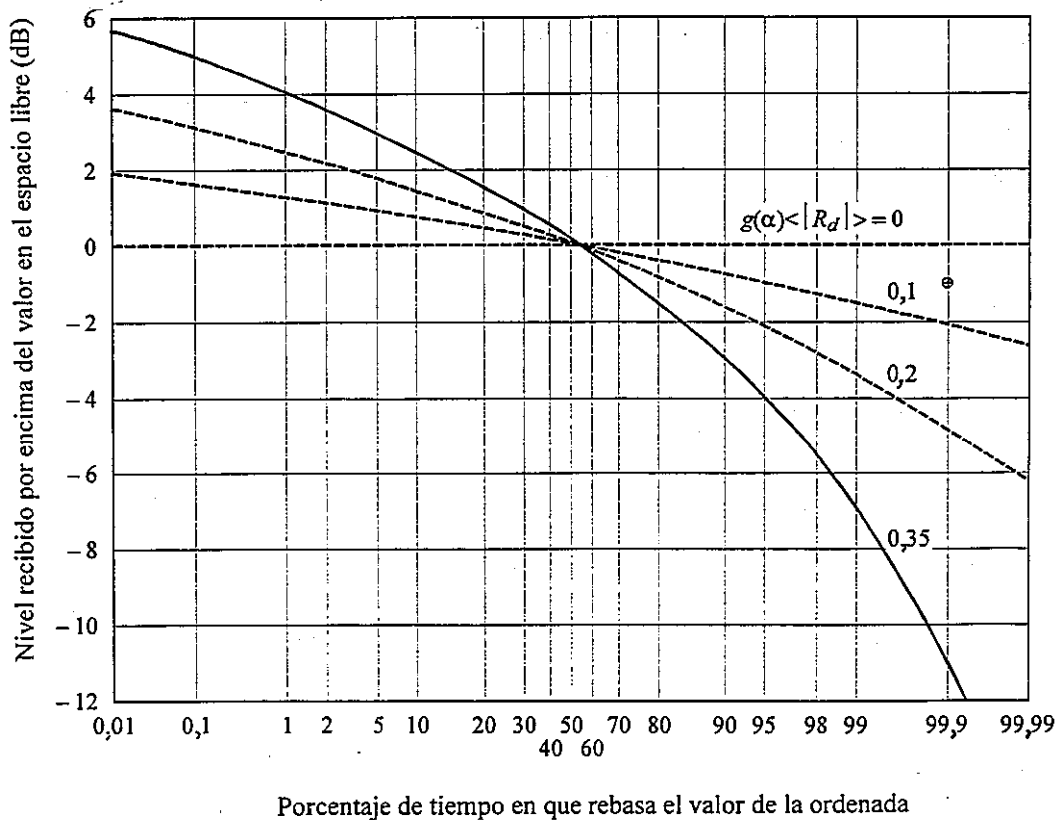
Se supone que la suma de la componente directa y de la componente especular es E_0 (es decir, se ignora la componente especular).

$$\text{Magnitud de la señal recibida resultante} = E_0 [1 + |R_d| g(\alpha)]$$

donde $|R_d|$ presenta una distribución de Rayleigh y $g(\alpha)$ toma el valor 0,63 (o -4 dB), ganancia copolar de la antena receptora para ángulos con respecto al eje de puntería superiores a 30°.

La señal recibida resultante tiene una distribución de Nakagami-Rice (véase la Recomendación UIT-R P.1057) y puede determinarse mediante la figura 8.16. Debido a la discriminación de la antena, el valor de $\langle |R_d| \rangle g(\alpha)$ utilizado en la figura 8.16 debe ser $(0,08)(0,63) = 0,05$. Como se muestra mediante el símbolo \oplus en la figura, cabe esperar que el desvanecimiento de la señal causado por la dispersión difusa rebase el valor de aproximadamente 1 dB durante el 99,9% del tiempo en condiciones de visibilidad directa. Este nivel de desvanecimiento es bastante pequeño y apenas tiene consecuencias en el diseño del sistema.

Esta misma conclusión, sin embargo, generalmente no es válida para la dispersión en la superficie del mar (véase el punto 8.2.2.3.1). Además, como se indica en la ecuación (8.8), la rugosidad efectiva de una superficie aumenta al hacerlo la frecuencia (o al disminuir λ) de manera que la intensidad relativa de la componente difusa aumentará con la frecuencia. (Sin embargo, en las frecuencias más elevadas las antenas utilizadas generalmente son más directivas y, en consecuencia, pueden proporcionar una mejor discriminación frente a la componente difusa que en el ejemplo indicado.)



El símbolo \oplus corresponde a los valores de los parámetros utilizados en el ejemplo.

FIGURA 8.16

Distribución de amplitud (en dB) de una señal coherente combinada con una señal reflejada con distribución de Rayleigh (reducida por la ganancia de la antena fuera del eje de puntería, $g(\alpha)$) (según Beckmann y Spizzichino [1963])

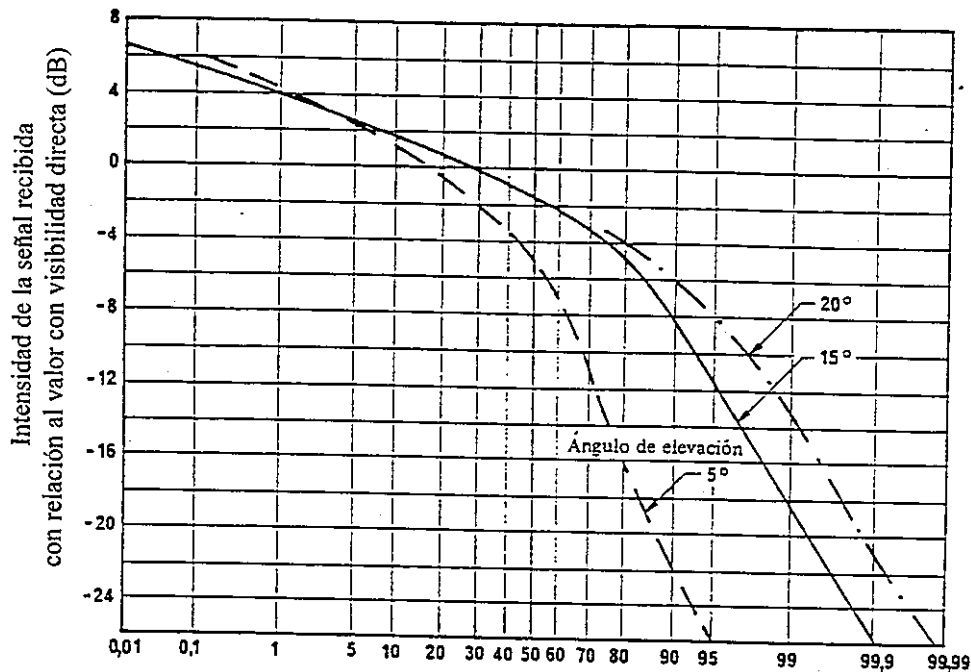
8.2.7 Resultados de las mediciones experimentales

La complejidad de los fenómenos de apantallamiento, bloqueo y multitrayecto en los trayectos de propagación del SMS, especialmente en los enlaces del SMTS obliga a depositar un largo grado de confianza en los resultados empíricos para desarrollar los modelos de predicción. En este punto se presentan algunos resultados experimentales seleccionados para ilustrar las características de las degradaciones y las magnitudes típicas de los correspondientes deterioros de la señal. Además, se indican algunos datos medidos sobre las características de la reflexión en la superficie. Se dispone de un resumen de los datos sobre el SMTS obtenidos en experimentos llevados a cabo en varios países así como un análisis de los resultados para los modelos de propagación del SMTS [Goldhirsh y Vogel, 1992].

8.2.7.1 Mediciones en el SMTS

Para mayor conveniencia se hace hincapié en los resultados de una serie de mediciones llevadas a cabo en el SMTS en Canadá [Butterworth y Matt, 1983; Butterworth, 1984], algunas de ellas con fuentes de satélite simuladas, para ilustrar la influencia que tienen en el desvanecimiento los parámetros del trayecto de propagación.

En la figura 8.17 se observan las funciones de distribución obtenidas en las series de mediciones realizadas durante el verano (árboles con hojas). Una tercera parte de las rutas de medición discurrían por zonas de bosque. Se repitieron las mediciones con un helicóptero a diferentes alturas, con objeto de proporcionar ángulos de elevación de 5°, 15° y 20° a la antena receptora. Durante las mediciones realizadas a 5° de elevación, además del rápido desvanecimiento debido a la propagación difusa por trayectos múltiples, se observó un desvanecimiento lento con una profundidad de unos 8 dB en las zonas de terreno despejado. Se dedujo que el desvanecimiento lento se debía a la reflexión especular. No se observó dicho efecto para ángulos de elevación superiores.



Porcentaje de ubicaciones en que la señal es superior al valor indicado en ordenadas

FIGURA 8.17

Funciones de distribución de los datos registrado a 870 MHz para diferentes ángulos de elevación

Las mediciones efectuadas a 1 542 MHz, utilizando el satélite MARECS-A con un ángulo de 20° condujeron a resultados similares. Se observó que las características del desvanecimiento dependen del medio local, como se ilustra en la figura 8.18 [Butterworth, 1984]. Los datos típicos de las pruebas podrían simularse muy aproximadamente suponiendo que las señales de los trayectos múltiples presentan una distribución de Rayleigh, con una potencia media de 10 dB inferior a la señal directa sin atenuar. Los efectos de apantallamiento se simularon suponiendo un efecto de atenuación del tipo distribución log-normal para la señal directa, con una atenuación para la señal directa media característica de 7,5 dB, y una desviación típica característica de 3 dB.

Se pueden comparar directamente los datos obtenidos en ambas frecuencias. Se efectuaron mediciones por rutas de la zona experimental, con un 35% de bosque y terreno despejado, en 870 MHz y 1 542 MHz. Los tipos de antena utilizados para ambas frecuencias eran dipolos cruzados inclinados (en torniquete) con polarización circular y diagramas de radiación análogos y con una fuente de señal en el mismo ángulo de elevación de 20°. En la figura 8.19 se observa dicha comparación. Como era de esperar, debido al incremento de la atenuación producida por la vegetación con la frecuencia, la pérdida excesiva del trayecto a 1 542 MHz es mucho mayor que la pérdida a 870 MHz en la zona de cobertura de la región estudiada, es decir más del 90%.

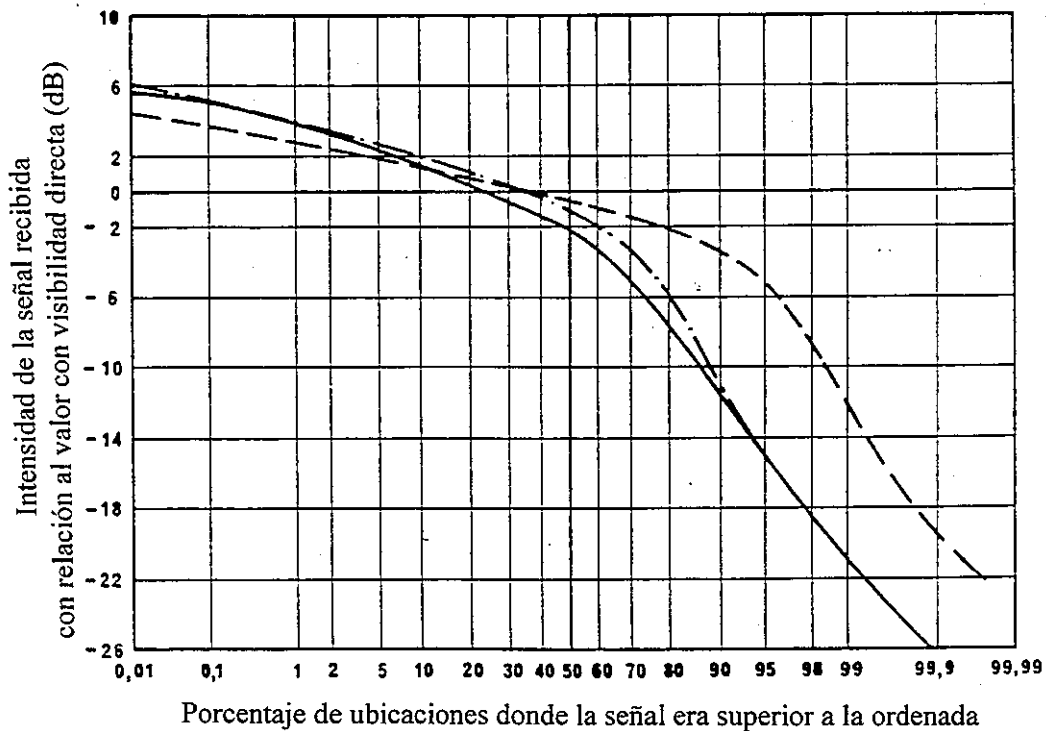


FIGURA 8.18

Funciones de distribución de la envolvente registradas a 1 542 MHz con polarización circular y un ángulo de elevación de 20°, para diferentes clases de terreno

———— Suburbano
- . - . - . Rural/forestal
- - - - - Rural/agrario

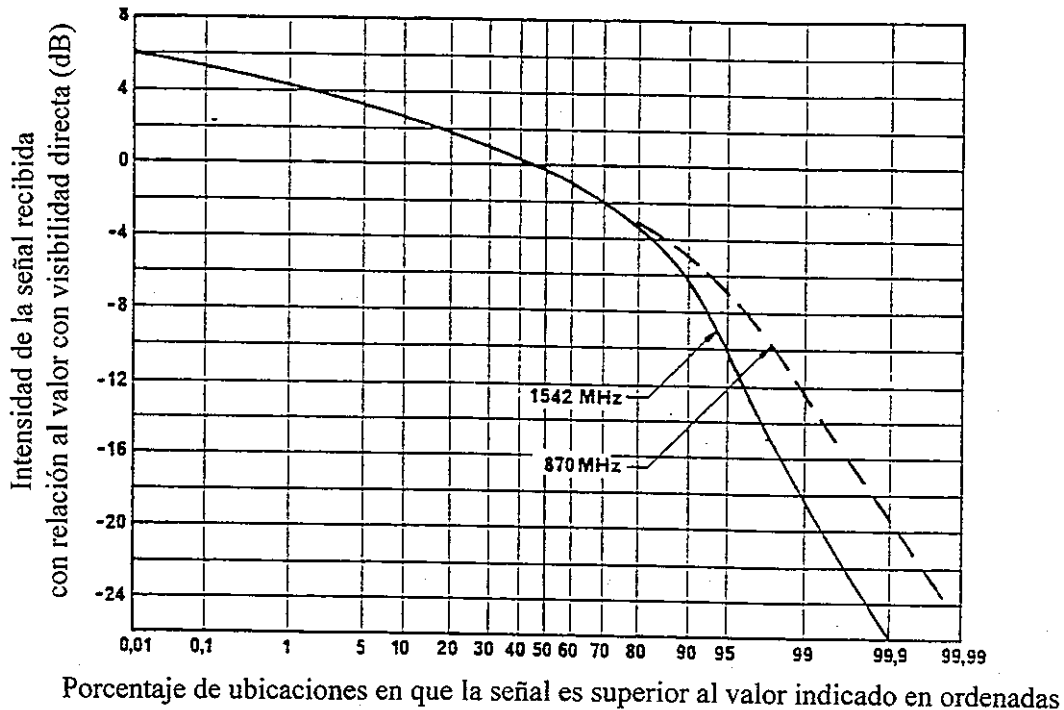


FIGURA 8.19

Comparación de los datos registrados a 870 y 1 542 MHz en la misma zona experimental, con el mismo tipo de antena y para un ángulo de elevación de la fuente de señal de 20°

En varias mediciones las degradaciones del aislamiento entre las componentes copolar y contrapolar se relacionaron con el correspondiente desvanecimiento por trayecto múltiple del canal copolar. Las distribuciones de equiprobabilidad de las señales copolar y contrapolar basadas en múltiples series de mediciones sobre el SMTS llevadas a cabo en Australia [Goldhirsh y Vogel, 1992] indicaron que el aislamiento se degradaba aproximadamente 11 dB para un desvanecimiento copolar de 5 dB. En consecuencia, no parece probable una reutilización de frecuencias con éxito utilizando canales de señales con doble polarización en los trayectos móviles por satélite debido a la dispersión multitrayecto en el canal con polarización cruzada.

8.2.7.2 Mediciones de los efectos del multitrayecto por reflexión en la superficie del mar

Se realizó un estudio de la propagación por trayectos múltiples en 1,6 GHz con una aeronave KC-135 y el satélite ATS-6 de la NASA [Schroeder y otros, 1976]. Se midieron las características de la señal con un conjunto de guías de onda de dos elementos en el radomo del morro de la aeronave, con anchuras de haz de 1 dB de 20° en acimut y 50° en elevación. Se recogieron datos sobre el océano y sobre la tierra a una altitud nominal de la aeronave de 9,1 km y a una velocidad nominal respecto al suelo de 740 km/h.

El valor cuadrático medio del coeficiente de dispersión, Γ , se define como

$$\Gamma = G \frac{\langle |I|^2 \rangle}{\langle |D|^2 \rangle} \quad (8.25)$$

donde:

- G : ajuste para tener en cuenta diferencias de ganancia entre los canales directo e indirecto;
- $\langle |I|^2 \rangle$: valor cuadrático medio de la potencia de la componente propagada por trayectos múltiples medida en el receptor;
- $\langle |D|^2 \rangle$: valor cuadrático medio de la potencia de la componente directa medida en el receptor.

En los experimentos del ATS-6 se midieron coeficientes para polarizaciones de antena horizontal y vertical. En la figura 8.20 se muestra el valor cuadrático medio de las pendientes de la superficie del mar de 3° y 12° en función del ángulo de elevación, junto con las predicciones derivadas de un modelo de óptica física [Staras, 1968]. Se observó que la pendiente del mar tiene un efecto mínimo para ángulos de elevación superiores a unos 10° . La concordancia entre los coeficientes medidos y los previstos para una tierra plana lisa, modificados por el factor de divergencia de una tierra esférica aumentó a medida que disminuyó la pendiente del mar. La relación entre el valor cuadrático medio de la pendiente de la superficie del mar y la altura de la ola es compleja pero pueden realizarse conversiones [Karasawa y Shiokawa, 1984a].

Para la mayoría de los sistemas aeronáuticos, la polarización circular será de mayor interés que la lineal. Para el caso simplificado de reflexión en una tierra lisa (que debe ser una hipótesis adecuada para ángulos de elevación superiores a 10°), los coeficientes de dispersión copolar circular y de polarización cruzada (Γ_c y Γ_x , respectivamente) pueden expresarse en términos de los coeficientes horizontal y vertical (Γ_h y Γ_v , respectivamente) mediante

$$\Gamma_c = (\Gamma_h + \Gamma_v)/2 \quad ; \quad \Gamma_x = (\Gamma_h - \Gamma_v)/2 \quad (8.26)$$

para polarización circular incidente dextrógira o levógira. Normalmente, los coeficientes horizontal y vertical tienen un valor complejo. Por tanto, se requiere información de fase para aplicar la ecuación (8.26) a las curvas de la figura 8.20.

8.3 Efectos ambientales locales

Los efectos del entorno local aquí considerados son las contribuciones del ruido procedente de diversas fuentes situadas en las proximidades de la estación terrena terminal y la influencia de la superestructura del barco en el funcionamiento de los terminales móviles marítimos. En el punto 4 de la Recomendación UIT-R P.681 aparecen modelos para predecir los efectos en la propagación causados por el bloqueo y el apantallamiento local.

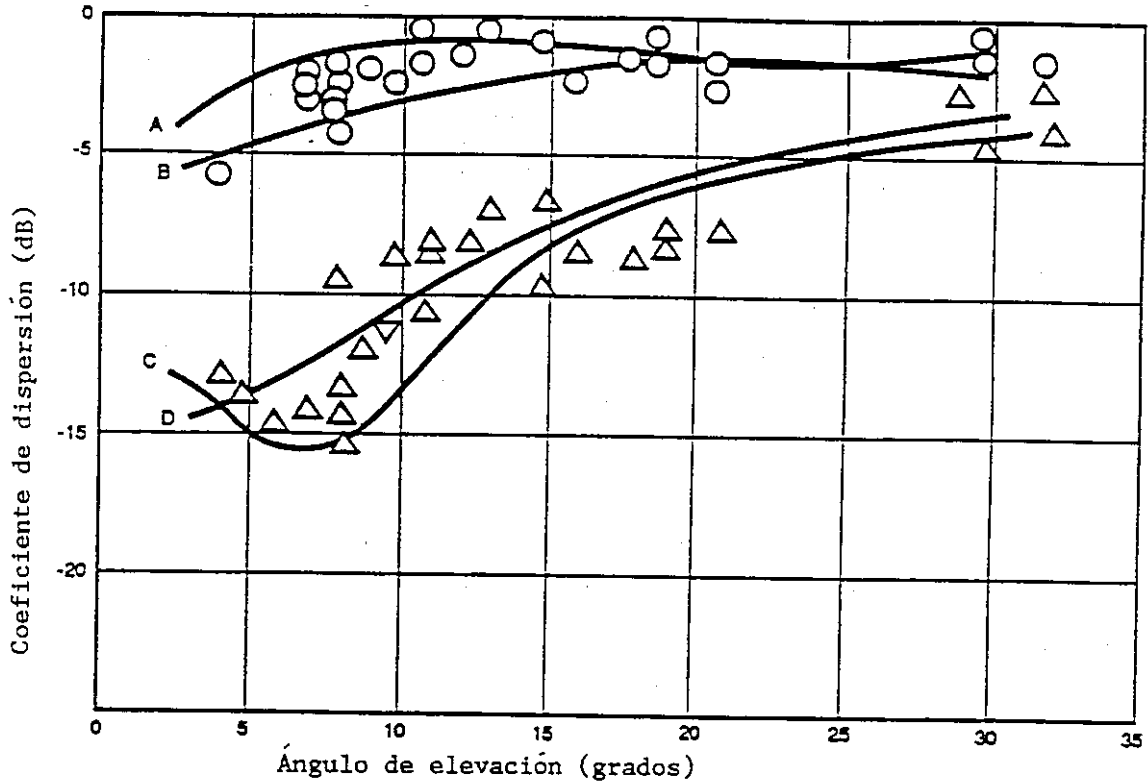


FIGURA 8.20

Valor cuadrático medio de los coeficientes de dispersión oceánica en función del ángulo de elevación en 1,6 GHz

- O: Mediciones con polarización horizontal
- Δ: Mediciones con polarización vertical
- A: Predicción con polarización horizontal, pendiente de 3°
- B: Predicción con polarización vertical, pendiente de 12°
- C: Predicción con polarización vertical, pendiente de 3°
- D: Predicción con polarización vertical, pendiente de 12°

8.3.1 Contribución del ruido del medio local

A continuación figuran algunas contribuciones del ruido procedente del medio local en el que funciona la estación terrena terminal:

- *Ruido atmosférico procedente de la absorción*

Los medios absorbentes tales como el oxígeno, el vapor de agua y las partículas de precipitación emiten ruido térmico que puede describirse en términos de temperatura de ruido de la antena. Estos efectos se consideran en el Capítulo 4.

- *Ruido artificial*

Los equipos eléctricos potentes tienden a generar ruido de banda ancha que puede provocar interferencia en los receptores sensibles. Un alto porcentaje de este ruido se origina como ruido impulsivo de banda ancha procedente de los circuitos de ignición. El ruido ambiente generado por los automóviles y los camiones varía según la intensidad del tráfico y, en consecuencia, depende de la hora del día. El ruido puede tener una variación en magnitud de hasta 20 dB según se mida en días laborables normales, en fines de semana o época de vacaciones cuando su magnitud es inferior.

- *Emisiones fuera de banda procedentes del radar*

Los radares a bordo de barcos y los radares de vigilancia que funcionan en modo impulsivo pueden generar emisiones fuera de banda que causen interferencia a los receptores móviles. Por regla general tales emisiones pueden suprimirse insertando filtros de guías o coaxiales a la salida del transmisor del radar.

- *Interferencia procedente de transmisores de comunicaciones de alta potencia*

Los transmisores terrenales de alta potencia (por ejemplo, los de radiodifusión en ondas decamétricas o los de televisión) pueden interferir las estaciones terrenas terminales móviles.

- *Interferencia procedente de automóviles*

En ciertas condiciones de funcionamiento, las emisiones de radiofrecuencia procedentes del tráfico rodado pueden degradar la sensibilidad del receptor. En una medición se registró un valor de ruido procedente de un tráfico intenso de -150 dB(mW/Hz) dentro de la banda de frecuencias 1 535 - 1 660 MHz [Clarke y otros, 1974].

- *Ruido de astilleros*

En los astilleros de la Armada de Boston se registraron señales de ruido con amplitudes de cresta extremadamente elevadas de hasta -141 dB(mW/Hz); en la época en que se realizaron las mediciones el astillero se encontraba a pleno funcionamiento [Clarke y otros, 1974]. Este ruido es una combinación del ruido ambiente de la ciudad y del ruido electromagnético de banda ancha procedente de los equipos industriales.

8.3.2 Bloqueo por la superestructura de los barcos

La superestructura del barco puede originar tanto un multitrayecto por reflexión como un bloqueo en dirección del satélite. La mayor parte de las reflexiones producidas por la superestructura del barco pueden considerarse coherentes con la señal directa. La profundidad del desvanecimiento debida a estas reflexiones depende de cierto número de parámetros entre los que pueden citarse los siguientes:

- forma del barco;
- emplazamiento de la antena del barco;
- directividad de la antena y nivel del lóbulo lateral;
- relación axial y orientación de la elipse de polarización;
- acimut y ángulos de elevación hacia el satélite.

La ganancia de antena tiene una influencia muy significativa en la profundidad del desvanecimiento. Las antenas de baja ganancia con anchuras de haz más amplias captarán más señales reflejadas, produciendo de esa forma desvanecimientos más profundos.

El bloqueo viene causado por superestructuras del barco tales como el mástil y diversos tipos de antenas desplegadas en el barco. En la figura 8.21 se representa la geometría del bloqueo producido por un mástil. La atenuación de la señal depende de varios parámetros tales como el diámetro de la columna, la distancia entre la antena y la columna y el tamaño de la antena. En la figura 8.22 se representa la atenuación estimada debida al bloqueo producido por una estructura de tipo columna para antenas de 20 dB y 14 dB de ganancia.

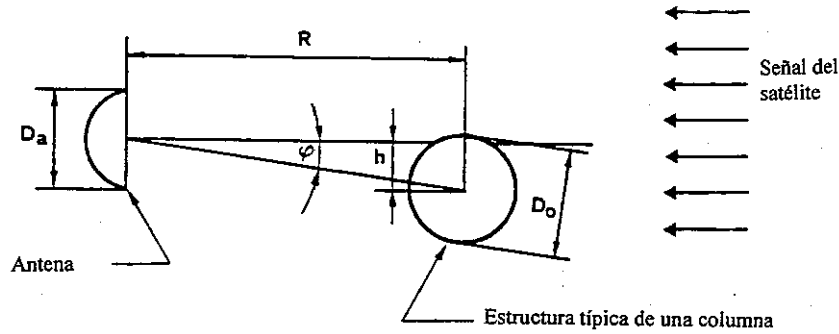


FIGURA 8.21
Geometría del bloqueo

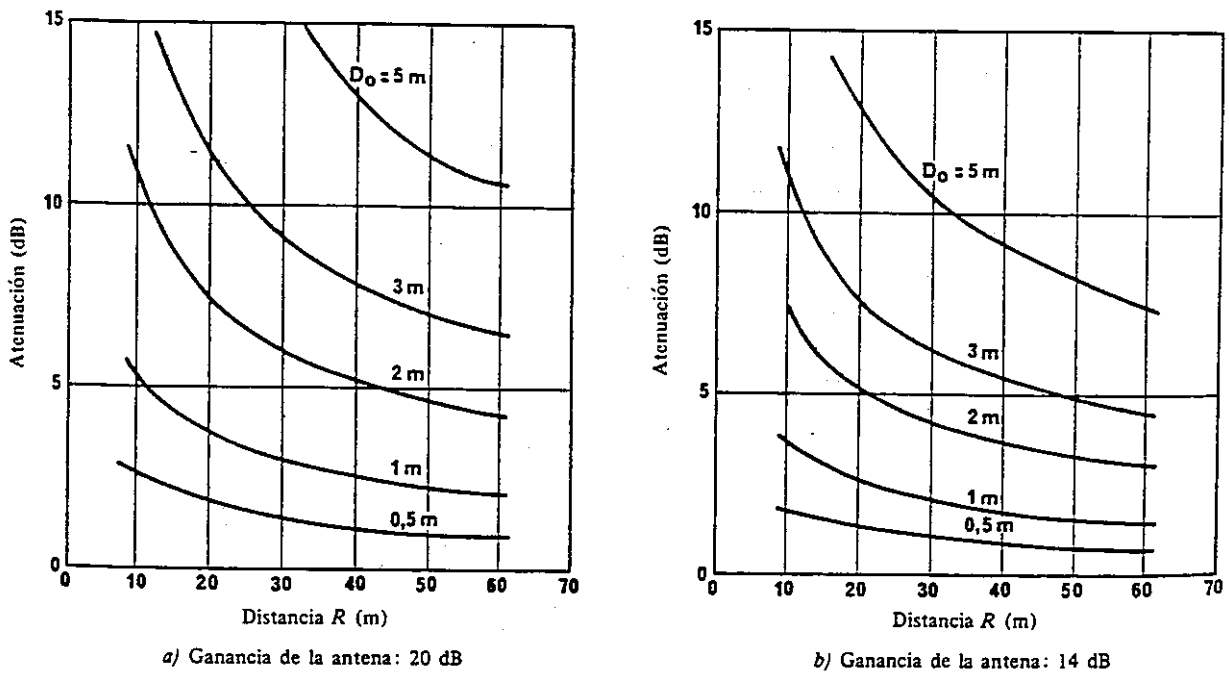


FIGURA 8.22
Valor estimado de la atenuación debida al bloqueo

8.3.3 Movimiento de la antena móvil

El movimiento de las antenas móviles es una consideración importante que debe tenerse en cuenta en el diseño de los sistemas de comunicaciones del servicio móvil marítimo por satélite. El nivel de la señal recibida resulta afectado por la ganancia de la antena fuera del haz debido a que el movimiento de la antena viene influenciado por el movimiento del barco. El movimiento aleatorio del barco debe compensarse mediante un mecanismo de estabilización adecuado que mantenga la antena adecuadamente apuntada hacia el satélite. Esto normalmente se logra mediante una plataforma con estabilizador por gravedad pasivo o un sistema activo de seguimiento de antena. En cualquier caso el error de puntería de antena residual puede ser lo suficientemente importante como para justificar su inclusión en el cálculo del enlace global.

La evidencia experimental [Sato y otros, 1984] sugiere que el movimiento de balanceo de un barco sigue una distribución gaussiana de media cero a corto plazo. La desviación típica de la distribución, σ_s , es función de las características del buque y del estado de mar o la altura de las olas. En la figura 8.23 se representa la distribución del ángulo de cabeceo instantáneo de un barco cuando las condiciones meteorológicas oscilan entre mar fuerte y mar gruesa. La distribución del movimiento del barco puede aproximarse por una distribución gaussiana con una σ_s de 5,42. En la figura también aparece la distribución del ángulo de cabeceo de una antena con estabilización pasiva sometida a las mismas condiciones; esta distribución también puede aproximarse por una distribución gaussiana de media cero con una desviación típica de 0,99. La relación entre las desviaciones típicas de ambas distribuciones depende del diseño del estabilizador pasivo. Aunque el movimiento de la antena se reduce en gran medida, dependiendo de la anchura de haz de la antena, el error de puntería residual puede ser lo suficientemente importante como para provocar fluctuaciones de la señal apreciables.

En periodos de tiempo largos σ_s varía en función de las condiciones de la superficie del mar y su distribución puede aproximarse por una distribución log-normal o una distribución de Weibull [Nishinokubi y Kawashima, 1976].

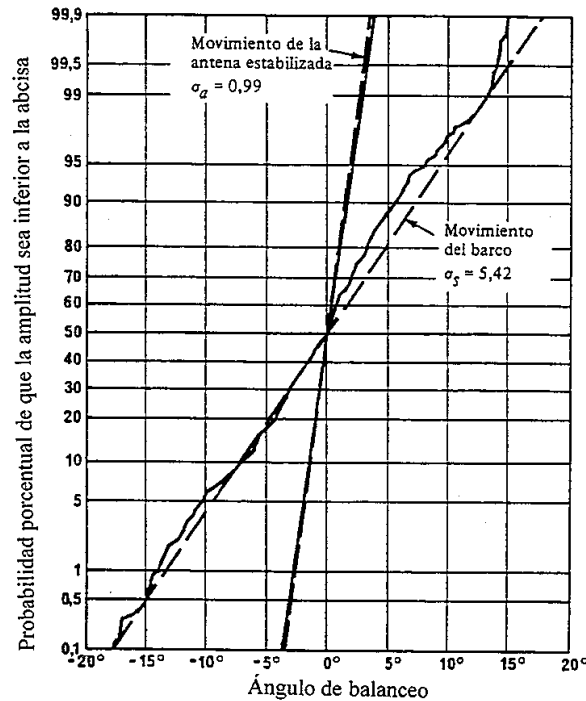


FIGURA 8.23

Movimiento de la antena estabilizada medido

- Valores medidos
 - - - - - Valores calculados
- Altura de las olas: 5 m aproximadamente

REFERENCIAS PARA EL CAPÍTULO 8

- BEARD, C.I. [1961] Coherent and incoherent scattering of microwaves from the ocean. IRE Trans. Ant. Prop., Vol. AP-9, 5, 470-483.
- BECKMANN, P. y SPIZZICHINO, A. [1963] The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. Pergamon Press, Nueva York/Oxford.
- BENZAIR, B., SMITH, H. y NORBURY, J.R. [1991] Tree attenuation measurements at 1 - 4 GHz for mobile radio systems, International Conference on Mobile Radio and Personal Communications, Coventry, 16-20.
- BOITHIAS, L. [1987] Radiowave Propagation. McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1987.
- BUTTERWORTH, J.S. y MATT, E.E. [1983] The characterization of propagation effects for land-mobile satellite services. IEE Conf. Publ. No. 222 (Satellite systems for mobile communications and navigation), 51-54.
- BUTTERWORTH, J.S. [1984] Propagation measurements for land mobile satellite systems at 1 542 MHz. CRC Technical Note No. 723, Communications Research Centre, Ottawa, Canadá.
- CLARKE, J.M., CANTOR, S.R., WINCHUS, J.J. y CAPORALE, A.L. [1974] Measurement and analysis of L-band (1535-1660 MHz) electromagnetic (EM) noise on ships. Final Report No.†CG-D-50-75, U.S. Dept. of Transportation, Washington, D.C.
- DAVARIAN, F. [1988] Irreducible error rate in aeronautical satellite channels. *Electron. Lett.*, Vol. 24, 21, 1332-1333.
- DeSANTO, J.A. [1981] Scattering from a rough interface. *Radio Sci.*, Vol. 16, 6, 1021-1024.
- DISSANAYAKE, A.W., JONGEJANS, A.W. y DAVIES, P.E. [1985] Preliminary results of PROSAT maritime-mobile propagation measurements. IEE Conf. Publ. No. 248, 338-342, *IEE Fourth Int. Conf. Antennas Propagat.*, Univ. Warwick, Coventry, Reino Unido.
- GOLDHIRSH, J. y VOGEL, W.J. [1987] Roadside tree attenuation measurements at UHF for land mobile satellite systems. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-35, 589-596.
- GOLDHIRSH, J. y VOGEL, W.J. [1992] *Propagation effects for Land Mobile Satellite Systems*. NASA Reference Publication 1274.
- HAGENAUER, J., NEUL, A., PAPKE, W., DOLAINSKY, F. y EDBAUER, F. [1987] The aeronautical satellite channel. DFVLR Tech. Rep. No. NE-NT-T-87-17, mayo, DFVLR.
- HALL, M.P.M. [1979] *Effects of the Troposphere on Radio Communication*. IEE Electromagnetic Wave Series, 8, Peter Peregrinus Ltd., Londres, Reino Unido.
- IEEE Vehicular Technology Society Committee on Radio Propagation [1988] Coverage prediction for mobile radio systems operating in the 800/900 MHz frequency range. *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, Vol. VT-37, 3-72.
- JONGEJANS, A. DISSANAYAKE, A., HART, N., HAUGLI, H., LOISY, C. y ROGARD, R. [1986] PROSAT Phase I Report, European Space Agency, STR-216.

- KARASAWA, Y., MATSUDO, T. y SHIOKAWA, T. [1990a] Wave height and frequency dependence of multipath fading due to sea reflection in maritime satellite communications. *Electron. Commun. Japan, Part 1*, Vol. 73,1, 95-106. (Translated from IEICE Vol. 72-BII, 4, 1989).
- KARASAWA, Y. y SHIOKAWA, T. [1984a] Characteristics of L-band multipath fading due to sea surface reflection. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-32, 6, 618-623.
- KARASAWA, Y. y SHIOKAWA, T. [1984b] Spectrum of L-band multipath fading due to sea surface reflection. *Trans. IECE of Japan*, Vol. J67-B, 2, 171-178.
- KARASAWA, Y. y SHIOKAWA, T. [1987] Fade duration statistics of L-band multipath fading due to sea surface reflection. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-35, 8, 956-966.
- KARASAWA, Y. y SHIOKAWA, T. [1988] A simple prediction method for L-band multipath fading in rough sea conditions. *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 36, 10, 1098-1104.
- KARASAWA, Y. y YASUNAGA, M. [1991] Interference evaluation method for mobile-satellite systems under Nakagami-Rice fading conditions. *Inst. Electro. Inform. Commun. Eng. Trans. Communications*, Vol. E75-B, 1, 42-49.
- KARASAWA, Y., YASUNAGA, M., SHIOKAWA, T. y YAMADA, M. [1990b] Propagation characteristics for aeronautical mobile-satellite systems. *13th AIAA Int. Commun. Sat. Sys. Conf.*, Los Angeles, 575-582, marzo.
- KINSMAN, B. [1965] *Wind waves, their generation and propagation on the ocean surface*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Nueva Jersey.
- KORN, I. [1989] Coherent detection of M-ary phase-shift keying in the satellite mobile channel. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 37, 10, 997-1003.
- LONG, M.W. [1975] *Radar reflectivity of land and sea*. Lexington Books, Lexington, MA, EE.UU.
- MILLER, A.R., BROWN, R.M. y VEGH, E. [1984] New derivation for the rough-surface reflection coefficient and for the distribution of sea-wave elevations. *IEE Proc.*, Vol. 131, Part H, 2, 114-116.
- NISHINOKUBI, H. y KAWASHIMA, R. [1976] On the sea keeping qualities of fishing by field measurement - III. *J. Japan Inst. Nav.*, 55, 1-6.
- OHMORI, S., IRIMATA, A., MORIKAWA, H., KONDO, K., HASE, Y. y MIURA, S. [1985] Characteristics of sea reflection fading in maritime satellite communications. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-33, 8, 838-845.
- PAPOULIS, A. [1965] *Probability, random variables and stochastic processes*, Sec. 14-4, McGraw-Hill, Nueva York.
- SANDOWELL, D.T. y AGREEN, R.W. [1984] Seasonal variation in wind speed and sea state from global satellite measurements. *J. Geophys. Res.*, Vol. 89, no. C2, 2041-2052.
- SANDRIN, W. y FANG, D.J. [1986] Multipath fading characterization of L-band maritime mobile satellite links. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 16, 2, 319-338.
- SATOH, K., NADAMAE, M. y MISHIMA, H. [1984] A simple ship-borne antenna stabilizer for limited area maritime satellite communication systems. 35th Cong. of the International Astronautical Federation (IAF), IAF 84-86.

- SCHROEDER, E.H. y otros [1976] Air traffic control experimentation and evaluation with the NASA ATS-6 satellite. The Boeing Company, Rep. No. FAA-RD-75-173.
- SIMMONS, A.J. [1981] EHF propagation through foliage, MIT Lincoln Laboratory TR-594.
- STARAS, H. [1968] Rough surface scattering on a communication link. *Radio Sci.*, Vol. 3, 6, 623-631.
- ULABY, F.T., WHITT, M.W. y DOBSON, M.C. [1990] Measuring the propagation properties of a forest canopy using a polarimetric scatterometer, *IEEE Trans. Antennas Propagat*, Vol. AP-38, 251-258.
- US DEPT of TRANSPORTATION [1973] ATS-5 multipath/ranging/digital data L-band experimental program - Phase V. Rep. No. FAA-RD-73-57-V.
- WALKER, E.H. [1983] Penetration of radio signals into buildings in the cellular radio environment, *BSTJ*, Vol. 62, 2719-2734.
- WEISSBERGER, M. y HAUBER, J. [1982] An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radiowaves by trees. ESD-TR-81-101, Electromagnetic Compatibility Analysis Center, Annapolis, MD, julio de 1982.
- WELLS, P.I. [1977] The attenuation of UHF radio signals by houses, *IEEE Trans. Vehicular Tech*, Vol. VT-26, 358-362.
- YASUNAGA, M. KARASAWA, Y., SHIOKAWA, T. y YAMADA, M. [1986] Characteristics of L-band multipath fading due to sea surface reflection in aeronautical satellite communications. *Trans. IECE of Japan*, Vol. E69, 10, 1060-1063.
- YOSHIKAWA, M. y KAGOHARA, M. [1989] Propagation characteristics in land mobile satellite systems, 39th IEEE Vehicular Technology Conf, 550-556.

CAPÍTULO 9

MODELO DE LOS EFECTOS COMBINADOS

Como se ha indicado en las secciones anteriores, un enlace Tierra-espacio puede verse afectado por varias degradaciones (véase el punto 1.2). Estas degradaciones pueden presentar entre ellas distintos grados de correlación o dependencia estadística.

Ejemplos de correlación entre los efectos de propagación son, por ejemplo, la atenuación causada por la lluvia y las nubes. Como la precipitación no puede producirse sin que haya nubes presentes, puede decirse que la probabilidad de la atenuación producida por las nubes condicionada a la presencia de precipitación es una de ellas. Sin embargo, la probabilidad de precipitación condicionada a la presencia de nubes no es evidentemente una de ellas (una nube puede producir o no una precipitación).

El modelado de los efectos combinados es el proceso de representar a la atenuación compuesta debida a todas las componentes atmosféricas. El resultado es una distribución de probabilidades conjuntas asociadas con la atenuación total a lo largo de un trayecto de propagación. El proceso considera la atenuación debida a cada efecto como una variable aleatoria. Las distribuciones de dichas variables aleatorias se combinan para constituir una probabilidad conjunta total basada en las hipótesis de dependencia e independencia.

El primer paso consiste en recopilar las distribuciones de atenuación basándose en la lluvia, en el vapor de agua, el oxígeno y los hidrosoles (nubes). En algunos casos también se necesitará una distribución de la atenuación debido al centelleo troposférico (véase el número 6.2). Estas distribuciones pueden obtenerse utilizando modelos o realizando mediciones.

Las distribuciones se representan normalmente como funciones de distribución acumulativas (FDA). Una FDA representa la probabilidad de que una variable aleatoria no rebase un valor determinado. El valor de la FDA para una variable aleatoria con un valor de X puede obtenerse integrando la función densidad de probabilidad (FDP) de la variable aleatoria entre $-\infty$ y X . Todas las operaciones analizadas con respecto a la distribución de la atenuación se llevan a cabo en las FDA. Una vez recopiladas todas las distribuciones de la atenuación, pueden obtenerse las estimaciones de los casos más desfavorable y más favorable suponiendo que los distintos efectos son dependientes o independientes desde el punto de vista estadístico.

9.1 Adición equiprobable

El primer método, adición equiprobable, supone una dependencia total entre cada uno de los efectos. La función de adición equiprobable para N efectos únicos viene dada por la expresión:

$$A_{TOTAL}(P) = A_1(P) + A_2(P) + \dots + A_N(P) \quad (9.1)$$

siendo $A_X(P)$ el valor de la atenuación en la FDA para el efecto X y un nivel de probabilidad fijo de P . Aplicando la función de adición equiprobable a todos los niveles de probabilidad se obtiene una distribución resultante de la atenuación total.

La hipótesis fundamental de la dependencia estadística en la adición equiprobable significa que todos los efectos están perfectamente correlacionados. Es decir, a medida que aumenta la atenuación debida a un efecto, aumentan todas ellas. Si bien intuitivamente parece razonable que los mayores índices de pluviosidad vengan generados por las nubes más cargadas, la lógica inversa no puede

aplicarse. De forma similar, cuando no llueve, se hace la hipótesis de que si la temperatura y la humedad permanecen constantes, la presencia de agua líquida en forma de nubes a lo largo del trayecto también permanece constante.

La adición equiprobable proporciona una predicción estadística de la atenuación "en caso más desfavorable". Esta predicción es la que mejor representa las estadísticas de la atenuación medidas cuando se consideran las probabilidades más elevadas [Feldhake, 1996]. Sin embargo, el nivel de probabilidad particular en el cual la adición equiprobable empieza a demostrar su mayor precisión depende del sistema de radiocomunicaciones específico y de los parámetros geofísicos.

9.2 Convolución

El segundo método para combinar los efectos es la convolución. El método convolucional supone una independencia estadística entre las fuentes de atenuación. Ello permite la aleatoriedad de los niveles de la señal debido al centelleo troposférico durante periodos de temperatura y humedad fijas. También considera los efectos del paso de las nubes cuando los otros fenómenos de atenuación en el trayecto permanecen constantes. Sin embargo, cuando se utiliza el método convolucional se considera una probabilidad finita de que se produzcan precipitaciones de lluvia extremas en ausencia de nubes. La distribución de atenuación total se calcula mediante la expresión:

$$P(A_{TOTAL}) = \int_{-\infty}^{A_{TOTAL}} P_1(A) \cdot P_2(A_{TOTAL} - A) dA \quad (9.2)$$

siendo $P_1(A)$ la densidad de probabilidad de la atenuación del efecto 1 y $P_2(A)$ la distribución acumulativa de la atenuación del efecto 2. Al realizar la convolución de las distribuciones de la atenuación debida a dos fuentes independientes debe tomarse la precaución de asegurar que la resolución de las distribuciones es suficiente como para producir un resultado preciso.

Suponiendo independencia estadística entre efectos, se incluye una segunda hipótesis en el sentido de que las variables aleatorias presentan una descorrelación perfecta. El resultado del método convolucional representa la condición más realista de "caso más favorable". Puede realizarse una predicción más optimista del "caso más favorable" si se supone entre los efectos una correlación negativa perfecta. Este tipo de dependencia puede observarse en las frecuencias próximas a las bandas de absorción de oxígeno, o dentro de ellas, entre las atenuaciones de aire seco y de vapor de agua [Salonen y otros, 1992]. Ello se debe al aumento de la atenuación de aire seco al disminuir la temperatura del aire, lo que produce igualmente una disminución en la densidad de vapor de agua y, en consecuencia, una menor atenuación de vapor de agua. A menos que satisfaga esta condición concreta debe utilizarse el método de convolución para predecir la distribución de caso más favorable.

9.3 Segmentación temporal

La utilización de adición equiprobable y convolución para combinar los efectos produce unos límites estadísticos superior e inferior. En circunstancias ideales, los límites serían definidos por la misma línea que ha creado la predicción sencilla. Si bien en la práctica esta condición nunca se dará, la segmentación temporal de los datos aproximará más los límites [Feldhake, 1996].

La segmentación temporal es el proceso de separar las estadísticas sobre la atenuación en distribuciones que representan unidades de tiempo más reducidas. Por ejemplo, estas distribuciones

pueden representar las condiciones mensuales, estacionales o de lluvia/ausencia de lluvia. Cuanto mayor sea la separación de los datos más proximidad habrá entre los límites superior e inferior definitivos.

Una vez segmentados temporalmente los datos, se obtienen los límites superior e inferior de la atenuación para cada segmento de tiempo utilizando las técnicas de convolución y adición equiprobable. A continuación, se combinan los límites inferiores para crear una distribución independiente del caso para el tiempo total. En las curvas dependientes del caso dependiente se lleva a cabo el mismo proceso. El proceso para generar las distribuciones de los límites superior e inferior para el periodo total de tiempo es el teorema de Bayes; dicho teorema sostiene que para un valor de la atenuación fijo, la probabilidad conjunta resultante puede obtenerse utilizando una media ponderada:

$$P_{RESULTANTE}(A) = \frac{P_1(A)W_1 + P_2(A)W_2 + \dots + P_N(A)W_N}{\sum_{n=1}^N W_n} \quad (9.3)$$

siendo $P_X(A)$ la probabilidad asociada con la FDA de la atenuación durante el periodo de tiempo X para una atenuación de valor fijo A . El valor del factor de ponderación, W_X , viene determinado por el intervalo de tiempo considerado por la FDA de un periodo. Por ejemplo, si las FDA de diciembre, enero y febrero se combinan para dar lugar a una resultante relativa al invierno, los valores del factor de ponderación son $W_{DIC} = 31$, $W_{ENE} = 31$, $W_{FEB} = 28,25$.

9.4 Adición cuadrática

Pueden suponerse distintas combinaciones de dependencia e independencia estadística entre los efectos para obtener una mejor estimación del desvanecimiento combinado global [Poiars Baptista y Davies, 1994; Watson y Hu, 1994; Salonen y otros, 1995; 1996]. La adición cuadrática equiprobable proporciona un resultado que se encuentra entre los límites estadísticos superior e inferior. Esta adición se considera en la Recomendación UIT-R P.618 para combinar los efectos del centelleo con la atenuación debida a la lluvia [Karasawa y Matsudo, 1991]. Puede expresarse de la forma siguiente:

$$A_{TOTAL} = \sqrt{A_1^2(P) + A_2^2(P)} \quad (9.4)$$

9.5 Ejemplo

En este ejemplo se comparan dos métodos combinatorios para las distribuciones del centelleo y atenuación utilizando los resultados de medidas llevadas a cabo con filtros y sin filtros mediante una radiobaliza de 11,2 GHz en Austin, Texas, sobre un trayecto con un ángulo de elevación de 5,8°. La figura 9.1 muestra las distribuciones acumulativas para el desvanecimiento total (línea continua), para la atenuación por absorción únicamente (línea de puntos-lluvia, gases atmosféricos y nubes) y para el desvanecimiento por centelleo (línea de puntos y rayas). También se muestran las distribuciones de atenuación total obtenidas de las distribuciones de atenuación por centelleo y por absorción utilizando los métodos de convolución y de adición cuadrática. La distribución acumulativa del método de convolución difiere ligeramente de la distribución del desvanecimiento total medido mientras que el método que utiliza la adición cuadrática subestima el efecto del centelleo en la gama del margen de desvanecimiento bajo.

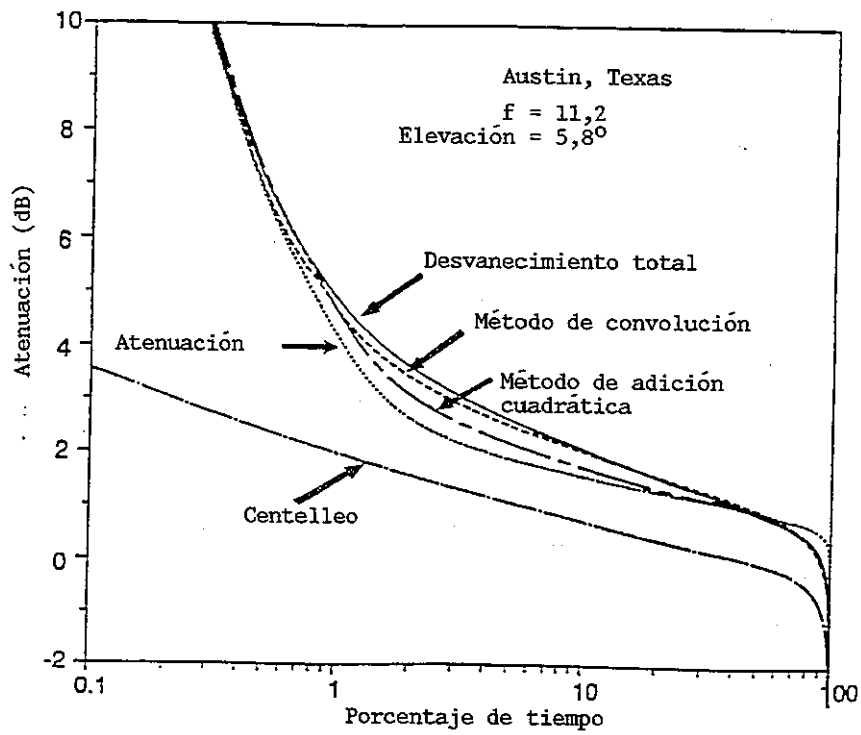


FIGURA 9.1

Distribuciones acumulativas a 11,2 GHz para un ángulo de elevación de $5,8^\circ$ en Austin (Texas), de junio de 1988 a mayo de 1992

REFERENCIAS PARA EL CAPÍTULO 9

- FELDHAKE, G.S., [1996] A sensitivity analysis of combined effects modelling, NAPEX XX, Fairbanks, Alaska.
- KARASAWA, Y. y MATSUDO, T. [1991] Characteristics of fading on low-elevation angle Earth-space paths with concurrent rain attenuation and scintillation, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. AP-39, 5, 657-661.
- POIARES BAPTISTA, J.P.V. y DAVIES, P.G. (Editors), [1994] *OPEX, Volume 1: Reference Book on Attenuation Measurement and Prediction*, European Space Agency, WPP-083, Noordwijk, Países Bajos.
- SALONEN, E., KARHU, S., JOKELA, P., ZHANG, W., UPPALA, S., AULAMO, H., SARKKULA, S. y POIARES BAPTISTA, J.P.V., [1992] Modelling and calculation of atmospheric attenuation for low-fade-margin satellite communications, *ESA Journal*, Vol. 16, 3, 615-622.
- SALONEN, E., KARHU, S., TERVONEN, J., [1995] Prediction of total atmospheric attenuation for low-fade margin satellite communications, 7º Simposio abierto de la Comisión F de la URSI, Ahmedabad, India.
- SALONEN, E., TERVONEN, J., VOGEL, W., [1996] Scintillation effects on total fade distributions for Earth-satellite links, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. AP-44, 1, 23.
- WATSON, P.A. and HU, Y.F., [1994] Prediction of attenuation on satellite-Earth links for systems operating with low fade margins, CLIMPARA '94, Comisión F de la URSI, Moscú, Rusia.
-

7322

Impreso en Suiza
Ginebra. 1996
ISBN 92-61-06363-2