

JOSÉ MARÍA HERNANDO RÁBANOS

Catedrático del Departamento de Señales, Sistemas
y Radiocomunicaciones de la E.T.S.I. de Telecomunicación
de la Universidad Politécnica de Madrid

COMUNICACIONES MÓVILES

Segunda edición



EDITORIAL CENTRO DE ESTUDIOS RAMÓN ARECES, S.A.

San Pedro de Victoria

ÍNDICE

PRÓLOGO A LA SEGUNDA EDICIÓN	XXI
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES	1
1.1. Radiocomunicaciones móviles: Consideraciones generales	1
1.2. Composición de un sistema de radiocomunicaciones móviles	2
1.3. Clasificación de los sistemas de comunicaciones móviles	3
1.4. Clases de canales en comunicaciones móviles	7
1.4.1. Canales símplex	7
1.4.2. Canales símplex a dos frecuencias	11
1.4.3. Canales semidúplex	11
1.4.4. Sistemas dúplex («full-duplex»)	12
1.5. Cobertura radioeléctrica en los sistemas móviles	13
1.6. Calidad de los sistemas de comunicaciones móviles	14
1.7. Evolución y panorámica de los sistemas de comunicaciones móviles	16
Capítulo 2. LA CAPA FÍSICA EN LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES	19
2.1. Introducción	19
2.2. La interfaz radio	20
2.2.1. Generalidades	20
2.2.2. Recursos de frecuencias y canalización	21
2.2.3. Entidades y parámetros de la interfaz radio	23
2.2.4. Modelo energético	24
2.2.5. Balance de un enlace radioeléctrico	27
2.3. Ruido en los sistemas móviles	28
2.3.1. Introducción	28
2.3.2. Factor de ruido de un sistema receptor	29
2.3.3. Relación portadora/ruido	32
2.4. Distribuciones estadísticas de la propagación radioeléctrica	33
2.4.1. Introducción	33
2.4.2. Distribución normal del campo	33

2.4.3.	Distribución Rayleigh	37
2.4.4.	Distribución Rayleigh + Log-Normal (RLN)	39
2.4.5.	Distribución Nakagami-Rice	41
2.5.	Técnicas de acceso múltiple	43
2.5.1.	Introducción	43
2.5.2.	Acceso múltiple FDMA	44
2.5.3.	Acceso Múltiple TDMA	48
2.5.4.	Acceso Múltiple SDMA	48
2.5.5.	Acceso múltiple CDMA	50
2.6.	Técnicas de espectro ensanchado y multiacceso DS-CDMA	50
2.6.1.	Introducción	52
2.6.2.	Expansión espectral por secuencia directa	60
2.6.3.	CDMA ortogonal	63
2.6.4.	Control de potencia	66
2.6.5.	Capacidad de multiacceso DS-CDMA	69
2.7.	Modulaciones utilizadas en comunicaciones móviles	69
2.7.1.	Introducción	69
2.7.2.	Modulación analógica	71
2.7.3.	Modulación digital	71
2.7.3.1.	Modulación MSK	74
2.7.3.2.	Modulaciones GMSK y TFM	75
2.7.3.3.	Modulación $\pi/4$ -DPSK	76
2.8.	Calidad de fidelidad	76
2.8.1.	Sistemas de modulación analógicos	78
2.8.2.	Sistemas de modulación digitales	78
2.8.2.1.	Introducción	78
2.8.2.2.	Probabilidad de error para FSK	80
2.8.2.3.	Probabilidad de error para GMSK	82
2.9.	Dimensionamiento de la interfaz radio	82
2.9.1.	Introducción	82
2.9.2.	Revisión de conceptos de tráfico telefónico	87
2.9.3.	Dimensionamiento con asignación rígida	88
2.9.4.	Dimensionamiento con asignación troncal	91
2.9.5.	Modelos de tráfico para servicios de radiopaquetes	99
Capítulo 3.	PROPAGACIÓN POR CANALES MÓVILES	99
3.1.	Introducción	101
3.2.	Características básicas de la propagación por canales móviles	101
3.2.1.	Variabilidad de la propagación	104
3.3.	Evolución de los modelos de predicción de la pérdida básica de propagación	105
3.4.	Métodos basados en teoría de rayos	105
3.4.1.	Trayectorias	106
3.4.2.	Representación de perfiles	107
3.4.3.	Zonas de sombra y visibilidad	107
3.4.4.	Difracción en obstáculos	109
3.4.5.	Métodos basados en la Teoría Geométrica de la Difracción	115
3.5.	Métodos empíricos de predicción de propagación	

3.5.1.	Introducción	115
3.5.2.	Método de Okumura-Hata	116
3.5.3.	Modelo COST-231	118
3.5.4.	Método de Xia	122
3.6.	Modelos de propagación para microcélulas	125
3.6.1.	Introducción	125
3.6.2.	Modelos LOS	126
3.6.3.	Modelos NLOS	127
3.7.	Modelos de propagación en interiores	130
3.7.1.	Atenuación de propagación	130
3.7.2.	Variación estadística	134
3.7.3.	Variación con la frecuencia	134
3.8.	Pérdidas por penetración en edificios	135
3.9.	Cobertura de túneles	136
3.9.1.	Introducción	136
3.9.2.	Modelos de propagación para transmisión con antenas	137
3.10.	Canales multirrayecto	140
3.11.	Caracterización de los canales multirrayecto	142
3.11.1.	Funciones de sistema	142
3.11.2.	Perfil potencia-retardo	144
3.11.3.	Función de coherencia de frecuencia	145
3.11.4.	Función de coherencia temporal	146
3.11.5.	Función dispersión Doppler	146
3.12.	Clasificación de los canales móviles	147
3.13.	Caracterización de canales multirrayecto en banda estrecha	149
3.13.1.	Introducción	149
3.13.2.	Señales respuesta de los canales de banda estrecha	150
3.13.3.	Estadísticas de las señales respuesta	152
3.14.	Caracterización de canal multirrayecto en banda ancha	158
3.15.	Correlación espacial	160
3.16.	Simulación del canal multirrayecto	161
3.16.1.	Introducción	161
3.16.2.	Simulador «Software» COST 207	162
3.16.3.	Simulación «Hardware» COST-207	165
3.17.	Mediciones de campo	168
3.18.	Herramientas de planificación de redes móviles	169
3.18.1.	Introducción	169
3.18.2.	Sistema de información geográfica	170
3.18.3.	Base de datos de elementos radioeléctricos	173
3.18.4.	Algoritmos de cálculo y simulación	173
3.18.5.	Análisis de cobertura zonal	174
3.18.6.	Análisis de medidas de propagación	176
3.18.7.	Métodos de planificación semi-automáticos	176
Capítulo 4.	SISTEMAS DE RADIOTELEFONÍA MÓVIL PRIVADA	179
4.1.	Introducción y características	179
4.2.	Estructura y conceptos básicos de una red PMR	180
4.3.	Señalización CTCSS	181

4.4.	Sistemas de llamada selectiva	184
4.5.	Sistema básico de despacho	188
4.6.	Redes con repetidores	189
4.6.1.	Redes con repetidor propio	190
4.6.2.	Red PMR con repetidor comunitario	191
4.6.3.	Redes con múltiples repetidores	194
4.7.	Redes con receptores satélite	194
4.8.	Red heterofrecuencial	195
4.9.	Redes isofrecuenciales	196
4.10.	Redes de comunicaciones móviles de datos	201
4.11.	Redes móviles con cable radiante	204
4.12.	Sistemas de radiobúsqueda	205
4.12.1.	Introducción	205
4.12.2.	Redes de radiomensajería	205
4.13.	Sistemas troncales	208
4.13.1.	Introducción	208
4.13.2.	Clasificación de los sistemas troncales	210
4.13.3.	Servicios de un sistema troncal	212
4.13.4.	Estructura de una red troncal	212
4.13.5.	Canales del sistema troncal	214
4.13.6.	Protocolo de señalización MPT 1327	216
Capítulo 5. PROYECTO DE SISTEMAS MÓVILES PMR/PAMR		221
5.1.	Introducción	221
5.2.	Estudio de necesidades y toma de datos	222
5.3.	Arquitectura de la red y dimensionamiento	223
5.4.	Cobertura radioeléctrica	224
5.4.1.	Consideraciones generales	224
5.4.2.	Sensibilidad de los receptores	225
5.4.3.	Intensidad de campo para sistemas móviles analógicos	225
5.4.4.	Intensidad de campo para sistemas móviles de datos	230
5.4.5.	Cálculo de la cobertura	230
5.5.	Compatibilidad electromagnética en los sistemas de comunicaciones móviles	234
5.5.1.	Interferencia electromagnética	234
5.5.2.	Ruido artificial	235
5.5.3.	Interferencia cocanal	235
5.5.4.	Respuestas parásitas del receptor	236
5.5.5.	Interferencia de intermodulación	236
5.5.6.	Interferencia de canal adyacente	240
5.5.7.	Ruido del transmisor	241
5.5.8.	Insensibilización y bloqueo del receptor	242
5.6.	Combinadores de transmisores	244
5.7.	Asignación de frecuencias	247
5.7.1.	Bases para la asignación	247
5.7.2.	Metodología de asignación	248
5.7.2.1.	Parametrización	249
5.7.2.2.	Preanálisis	249

5.7.2.3. Preselección	249
5.7.2.4. Compatibilidad	250
5.7.3. Selección de frecuencias	253
Capítulo 6. SISTEMAS MÓVILES CELULARES	257
6.1. Introducción	257
6.2. Fundamentos de los sistemas celulares	258
6.3. Características de las redes PLMN celulares	261
6.4. Planificación celular	264
6.5. Geometría de las redes celulares	266
6.6. División celular	274
6.7. Dimensionamiento de un sistema celular	279
6.7.1. Cálculo del radio celular y del tráfico	279
6.7.2. Rendimiento espectral	282
6.8. Cálculo de interferencias en los sistemas celulares	283
6.8.1. Planteamiento general	283
6.8.2. Método determinístico	286
6.8.3. Método estadístico	292
6.8.3.1. Interferencia log-normal simple	293
6.8.3.2. Interferencia log-normal múltiple	294
6.9. Cobertura e interferencia en sistemas celulares reales	295
6.10. Asignación de frecuencias en sistemas celulares	298
6.10.1. Bases de la asignación	298
6.10.2. Asignación fija	299
6.10.3. Asignación variable	304
6.10.4. Asignación dinámica	305
6.11. Arquitectura de las redes celulares	306
6.11.1. Consideraciones generales	306
6.11.2. Traspaso celular	309
6.12. Multiacceso CDMA celular	313
6.12.1. Consideraciones generales	313
6.12.2. Traspaso con continuidad	314
6.12.3. Limitación por interferencia en CDMA celular	316
6.12.4. Capacidad de los sistemas CDMA celulares	320
6.12.4.1. Capacidad y sensibilidad para el enlace ascendente	321
6.12.4.2. Capacidad y sensibilidad para el enlace descendente	332
Capítulo 7. SISTEMAS GSM y GPRS	341
7.1. Introducción	341
7.2. Especificaciones del sistema GSM	344
7.3. Servicios de telecomunicación GSM	348
7.3.1. Tipos de servicios	348
7.3.2. Servicios portadores	348
7.3.3. Teleservicios	349
7.3.4. Servicios suplementarios	350
7.3.5. Calidad de servicio (QOS)	351

7.4.	Arquitectura del sistema GSM	352
7.5.	Señalización en GSM	355
7.6.	Interfaz Um: canales lógicos	359
7.7.	Capa física de la interfaz radio GSM	362
7.7.1.	Introducción	362
7.7.2.	Multiacceso GSM	363
7.7.3.	Canales físicos	364
7.7.4.	Correspondencia Canales Lógicos-Canales Físicos	369
7.7.4.1.	Clases de correspondencia	369
7.7.4.2.	Información de la correspondencia	375
7.7.5.	Mensajes de difusión	377
7.7.6.	Mediciones de señal en la MS	377
7.7.7.	Codificación de canal	380
7.7.7.1.	Codificación de los bits de la señal vocal	380
7.7.7.2.	Codificación de los bits de señalización	383
7.7.7.3.	Codificación para la transmisión de datos	383
7.7.8.	Modulación	384
7.7.9.	Alineación temporal adaptativa	385
7.7.10.	Control de potencia	386
7.7.11.	Transmisión/Recepción discontinuas	387
7.7.12.	Funcionamiento con saltos de frecuencia	388
7.8.	Gestión de la movilidad	390
7.8.1.	Introducción	390
7.8.2.	Identificación de la estación móvil	390
7.8.3.	Funciones de seguridad	392
7.8.4.	Registro y localización de MS	394
7.9.	Gestión de llamadas	397
7.9.1.	Introducción	397
7.9.2.	Establecimiento de llamadas de MS a red fija	398
7.9.3.	Encaminamiento de las llamadas	401
7.9.4.	Cifrado	403
7.9.5.	Traspaso	403
7.9.5.1.	Clases de traspaso	403
7.9.5.2.	Medidas de señal para el traspaso	404
7.9.5.3.	Traspaso entre MSC	406
7.10.	Dimensionamiento de la red PLMN/GSM	408
7.10.1.	Introducción	408
7.10.2.	Modelo de red	408
7.10.3.	Modelo de tráfico	410
7.10.4.	Congestión de red	412
7.10.5.	Ejemplo de dimensionamiento	413
7.11.	Ingeniería radio en GSM	414
7.11.1.	Introducción	414
7.11.2.	Factor de ruido del sistema receptor	414
7.11.3.	Potencia umbral	416
7.11.4.	Margen de desvanecimiento	417
7.11.5.	Relación portadora/interferencia (C/I)	417
7.11.6.	Potencia isotropa y campo mediano	418
7.11.7.	Cuadro de balance de enlaces	418