

ÍNDICE

PRÓLOGO A LA TERCERA EDICIÓN	21
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE COMUNI- CACIONES MÓVILES	23
1.1. Consideraciones generales.....	23
1.2. Aspectos técnicos	25
1.2.1. Bandas de frecuencias.....	25
1.2.2. Modos de explotación	26
1.2.3. Multiacceso. Modulación.....	27
1.2.4. Cobertura.....	28
1.2.5. Parámetros de calidad	29
1.3. Evolución y panorámica de los sistemas de comunicaciones móviles	30
1.4. El sector de las comunicaciones móviles	34
Capítulo 2. LA CAPA FÍSICA EN LOS SISTEMAS DE COMUNI- CACIONES MÓVILES	41
2.1. Introducción.....	41
2.2. La interfaz radio	42
2.2.1. Generalidades.....	42
2.2.2. Recursos de frecuencias y canalización.....	44
2.2.3. Entidades y parámetros de la interfaz radio	45
2.2.4. Modelo energético.....	47
2.2.5. Balance de un enlace radioeléctrico.....	49
2.3. Ruido en los sistemas móviles.....	51
2.3.1. Introducción	51
2.3.2. Factor de ruido de un sistema receptor	51
2.3.3. Relación portadora/ruido.....	54

2.4.	Distribuciones estadísticas relacionadas con la propagación radioeléctrica	54
2.4.1.	Introducción	54
2.4.2.	Distribución normal del campo.....	55
2.4.3.	Distribución Rayleigh	58
2.4.4.	Distribución Nakagami-Rice.....	59
2.5.	Técnicas de acceso múltiple	61
2.5.1.	Introducción	61
2.5.2.	Acceso Múltiple FDMA.....	61
2.5.3.	Acceso Múltiple TDMA	63
2.5.4.	Acceso Múltiple CDMA	66
2.5.5.	Acceso Múltiple SDMA.....	69
2.6.	Técnicas de espectro ensanchado y multiacceso DS-CDMA.....	69
2.6.1.	Introducción	69
2.6.2.	Ensanchamiento espectral por secuencia directa	71
2.6.3.	DS-CDMA con secuencias pseudoaleatorias.....	74
2.6.4.	DS-CDMA con secuencias ortogonales.....	79
2.7.	Modulaciones utilizadas en comunicaciones móviles	80
2.7.1.	Introducción	80
2.7.2.	Modulación analógica	81
2.7.3.	Modulación digital con portadora única	82
2.7.3.1.	Modulación MSK	83
2.7.3.2.	Modulación GMSK	85
2.7.3.3.	Modulación $\pi/4$ -DPSK	87
2.7.3.4.	Modulación M-QAM.....	88
2.7.4.	Modulación digital con multiportadora.....	89
2.8.	Calidad de fidelidad.....	93
2.8.1.	Sistemas de modulación analógicos.....	93
2.8.2.	Sistemas de modulación digitales	93
2.8.2.1.	Introducción.....	93
2.8.2.2.	Probabilidad de error para FSK.....	94
2.8.2.3.	Probabilidad de error para GMSK.....	94
2.8.2.4.	Probabilidad de error para M-QAM	96
2.8.2.5.	Codificación de canal en los sistemas móviles	96
2.8.3.	Diversidad de recepción en comunicaciones móviles...	98
2.8.4.	Diversidad de transmisión en comunicaciones móviles.	100
2.9.	Dimensionamiento de la interfaz radio.....	102
2.9.1.	Introducción	102
2.9.2.	Revisión de conceptos de tráfico telefónico.....	103
2.9.3.	Dimensionamiento con asignación troncal	108
2.9.4.	Modelos de tráfico para servicios de paquetes por radio	111

Capítulo 3. PROPAGACIÓN POR CANALES MÓVILES.....	113
3.1. Introducción.....	113
3.2. Características básicas de la propagación por canales móviles..	115
3.2.1. Variabilidad de la propagación.....	115
3.3. Evolución de los modelos de predicción de la pérdida básica de propagación.....	118
3.4. Métodos basados en teoría de rayos	119
3.4.1. Trayectorias.....	119
3.4.2. Representación de perfiles	120
3.4.3. Zonas de sombra y visibilidad	121
3.4.4. Difracción en obstáculos.....	121
3.4.5. Métodos basados en la Teoría Geométrica de la Difracción.....	123
3.5. Métodos empíricos de predicción de propagación	124
3.5.1. Introducción	124
3.5.2. Método de Okumura-Hata	125
3.5.3. Modelo COST-231 Walfish-Ikegami.....	127
3.5.4. Método de Xia.....	131
3.6. Modelos de propagación para microcélulas	134
3.6.1. Introducción	134
3.6.2. Modelos LOS	135
3.6.3. Modelos NLOS	136
3.6.4. Modelos de la Recomendación UIT-R P.1411	138
3.7. Modelos de propagación en interiores.....	138
3.7.1. Atenuación de propagación.....	138
3.7.2. Variación estadística.....	142
3.7.3. Variación con la frecuencia.....	142
3.7.4. Modelo de la Rec. 1238 del UIT-R	142
3.8. Cobertura de interiores	143
3.9. Cobertura de túneles.....	145
3.9.1. Introducción	145
3.9.2. Modelos de propagación para transmisión con antenas ..	147
3.10. Canales multitrayecto	149
3.11. Caracterización de los canales multitrayecto	152
3.11.1. Canales variantes. Funciones de sistema	152
3.11.2. Caracterización estadística de los canales habituales ..	153
3.11.3. Efectos sobre la señal transmitida.....	156
3.12. Canales multitrayecto con señales de banda estrecha y de banda ancha.....	157
3.12.1. Resolución temporal de la señal.....	157
3.12.2. Canales multitrayecto con señales de banda estrecha..	158
3.12.3. Canales multitrayecto con señales de banda ancha.....	161
3.12.4. Modelos de canal usuales.....	162

3.13.	Caracterización de canales MIMO	163
3.14.	Herramientas de planificación de redes móviles	164
3.14.1.	Introducción	164
3.14.2.	Sistema de información geográfica	166
3.14.3.	Base de datos de elementos radioeléctricos	169
3.14.4.	Algoritmos de cálculo y simulación.....	169
3.14.5.	Análisis de cobertura zonal	170
3.14.6.	Análisis de medidas de propagación.....	171
3.14.7.	Métodos de planificación semi-automáticos	172
Capítulo 4.	SISTEMAS CELULARES CLÁSICOS	173
4.1.	Introducción.....	173
4.2.	Fundamentos de los sistemas celulares	174
4.3.	Características de las redes PLMN celulares.....	178
4.4.	Planificación celular	180
4.5.	Geometría de las redes celulares	182
4.6.	División celular	190
4.7.	Dimensionamiento de un sistema celular	192
4.7.1.	Cálculo del radio celular y del tráfico	192
4.7.2.	Rendimiento espectral.....	193
4.8.	Cálculo de interferencias en los sistemas celulares.....	194
4.8.1.	Planteamiento general	194
4.8.2.	Método determinista	197
4.8.2.1.	Células omnidireccionales.....	197
4.8.2.2.	Células sectorizadas.....	199
4.8.3.	Método estadístico	205
4.9.	Factor de geometría	206
4.10.	Cobertura e interferencia en sistemas celulares reales	208
4.11.	Asignación de frecuencias en sistemas celulares	210
4.12.	Estructura de las redes celulares.....	213
Capítulo 5.	SISTEMAS CELULARES AVANZADOS	217
5.1.	Introducción.....	217
5.2.	Sistemas celulares CDMA.....	217
5.2.1.	Sistemas limitados por dimensiones y sistemas limitados por interferencia	218
5.2.2.	Protección frente a desvanecimientos multitrajecto: receptor Rake	221
5.2.2.1.	Concepto general	221
5.2.2.2.	Estructura del receptor.....	221
5.2.2.3.	Sincronismo y estimación de canal	223
5.2.3.	Control de potencia	223
5.2.4.	Traspaso con continuidad.....	225

5.2.5.	Actividad discontinua de fuente.....	228
5.2.6.	Relación capacidad-cobertura	228
5.2.7.	Compartición automática de carga.....	229
5.2.8.	Multiplexación de servicios	229
5.2.9.	Codificación de canal de baja tasa	230
5.2.9.1.	Independencia del ancho de banda res- pecto de la codificación de canal	230
5.2.9.2.	Ensanchamiento por secuencia directa interpretado como codificación de canal	232
5.2.10.	Capacidad de sistemas celulares CDMA	233
5.3.	Sistemas de evolución de tercera generación	237
5.3.1.	Utilización de OFDM.....	237
5.3.2.	HARQ con combinación de retransmisiones.....	239
5.3.2.1.	Técnicas de retransmisión (H)ARQ con- vencionales	239
5.3.2.2.	Concepto de combinación de retransmi- siones	242
5.3.2.3.	Tipos de combinación.....	243
5.3.3.	Adaptación al canal radio.....	244
5.3.3.1.	Conceptos generales	244
5.3.3.2.	Modulación y codificación adaptativas. Informes de calidad del canal	245
5.3.3.3.	HARQ con combinación como adapta- ción de tasa	246
5.3.4.	Planificación de usuarios dependiente del canal radio.	246
5.3.4.1.	Concepto general	246
5.3.4.2.	Algoritmos de planificación más impor- tantes.....	248
5.3.5.	Técnicas MIMO	251
5.3.5.1.	Conceptos básicos sobre agrupaciones de antenas.....	252
5.3.5.2.	Ganancia de potencia y diversidad	254
5.3.5.3.	Multiplexación espacial.....	255
5.3.5.4.	Elección de la modalidad de transmisión ...	257
5.3.5.5.	Técnicas en bucle abierto y en bucle cerrado	258
5.3.5.6.	Multiplexación espacial multiusuario.....	261
5.3.6.	Reutilización de frecuencias y coordinación de interferencias en sistemas OFDM.....	261
5.3.6.1.	Métodos estáticos de reutilización de frecuencias.....	261
5.3.6.2.	Métodos dinámicos de reutilización de frecuencias.....	264

Capítulo 6. SISTEMAS DE RADIOTELEFONÍA MÓVIL PRIVADA.. 265

6.1.	Introducción y características	265
6.2.	Estructura y conceptos básicos de una red PMR.....	266
6.3.	Señalización CTCSS	267
6.4.	Sistemas de llamada selectiva.....	269
6.5.	Sistema básico de despacho	270
6.6.	Redes con receptores satélite.....	274
6.7.	Redes de comunicaciones móviles de datos	276
6.8.	Sistemas troncales	278
6.8.1.	Introducción	278
6.8.2.	Clasificación de los sistemas troncales	279
6.8.3.	Servicios de un sistema troncal.....	281
6.8.4.	Estructura de una red troncal	281
6.9.	Proyecto de sistemas móviles PMR/PAMR	284
6.9.1.	Introducción	284
6.9.2.	Estudio de necesidades y toma de datos	285
6.9.3.	Arquitectura de la red y dimensionamiento	286
6.9.4.	Cobertura radieléctrica.....	287
6.9.4.1.	Intensidad de campo mediano necesario	287
6.9.4.2.	Cálculo de la cobertura.....	291
6.10.	Compatibilidad electromagnética en los sistemas de comu- nicaciones móviles.....	295
6.10.1.	Interferencia electromagnética.....	295
6.10.2.	Combinadores de transmisores	301
6.10.3.	Asignación de frecuencias	303
6.11.	Sistema TETRA.....	304
6.11.1.	Introducción	304
6.11.2.	Bandas de frecuencias.....	305
6.11.3.	Servicios de TETRA	306
6.11.4.	Configuración funcional del TETRA.....	307
6.11.5.	Multiacceso TETRA	308
6.11.6.	Protocolos de comunicaciones.....	310
6.11.7.	Interfaz radio	311
6.11.8.	Procesado de señal en TETRA.....	312
6.11.9.	Canales lógicos de TETRA.....	315
6.11.10.	Canales físicos y ráfagas de TETRA.....	316
6.11.11.	Transmisión y recepción radio	321
6.11.12.	Balances de enlace	324
6.12.	Sistema DMR	326
6.12.1.	Generalidades.....	326
6.12.2.	Características radio de DMR.....	327

Capítulo 7. SISTEMAS GSM y GPRS	331
7.1. Introducción.....	331
7.2. Especificaciones del sistema GSM.....	334
7.3. Servicios de telecomunicación GSM	339
7.3.1. Tipos de servicios.....	339
7.3.2. Servicios portadores.....	339
7.3.3. Teleservicios.....	340
7.3.4. Servicios suplementarios.....	340
7.3.5. Calidad de servicio (QOS)	341
7.4. Arquitectura del sistema GSM	342
7.5. Señalización en GSM	346
7.6. Interfaz Um: canales lógicos	350
7.7. Capa física de la interfaz radio GSM.....	354
7.7.1. Introducción	354
7.7.2. Multiacceso GSM	354
7.7.3. Canales físicos.....	356
7.7.4. Correspondencia Canales Lógicos - Canales Físicos... 361	
7.7.4.1. Clases de correspondencia.....	361
7.7.4.2. Información de la correspondencia	366
7.7.5. Mensajes de difusión.....	368
7.7.6. Mediciones de señal en la MS.....	368
7.7.7. Codificación de canal	371
7.7.7.1. Codificación de los bits de la señal vocal ...	371
7.7.7.2. Codificación de los bits de señalización.....	373
7.7.7.3. Codificación para la transmisión de datos ..	374
7.7.8. Modulación	375
7.7.9. Alineación temporal adaptativa.....	376
7.7.10. Control de potencia	377
7.7.11. Transmisión/Recepción discontinuas.....	377
7.7.12. Funcionamiento con saltos de frecuencia	379
7.8. Gestión de la movilidad.....	380
7.8.1. Introducción	380
7.8.2. Identificación de la estación móvil.....	381
7.8.3. Funciones de seguridad	382
7.8.4. Registro y localización de MS	384
7.9. Gestión de llamadas.....	387
7.9.1. Introducción	387
7.9.2. Establecimiento de llamadas de MS a red fija	388
7.9.3. Encaminamiento de las llamadas	392
7.9.4. Cifrado	393
7.9.5. Traspaso	394
7.9.5.1. Clases de traspaso.....	394
7.9.5.2. Medidas de señal para el traspaso	394
7.9.5.3. Traspaso entre MSC	396

7.10.	Dimensionamiento de la red PLMN/GSM.....	398
7.10.1.	Introducción	398
7.10.2.	Modelo de red	398
7.10.3.	Modelo de tráfico	400
7.10.4.	Congestión de red.....	402
7.10.5.	Ejemplo de dimensionamiento.....	403
7.11.	Ingeniería radio en GSM	404
7.11.1.	Introducción	404
7.11.2.	Factor de ruido del sistema receptor	404
7.11.3.	Potencia umbral.....	405
7.11.4.	Margen de desvanecimiento.....	406
7.11.5.	Relación portadora/interferencia (C/I).....	407
7.11.6.	Potencia isotrópica y campo mediano.....	407
7.11.7.	Cuadro de balance de enlaces	408
7.11.8.	Supresión de canales adyacentes.....	410
7.11.9.	Agrupación celular y asignación de frecuencias.....	410
7.11.10.	Características de los transmisores	410
	7.11.10.1. Potencia de transmisión.....	410
	7.11.10.2. Espectro de RF de transmisión	411
7.11.11.	Características de los receptores	412
	7.11.11.1. Características de calidad	412
	7.11.11.2. Rechazo de interferencias.....	413
	7.11.11.3. Bloqueo y rechazo de parásitos	414
	7.11.11.4. Rechazo de intermodulación (IM).....	416
7.11.12.	Ingeniería de estaciones de base	416
7.11.13.	Ejemplos de montajes de BTS	419
7.12.	Red fija GSM.....	421
7.12.1.	Introducción	421
7.12.2.	Submultiplexación	423
7.12.3.	Configuraciones de BSS.....	424
7.13.	Sistema GPRS	427
7.13.1.	Introducción	427
7.13.2.	Características generales del GPRS	428
7.13.3.	Arquitectura de la red GPRS.....	431
7.13.4.	Arquitectura de Protocolos del GPRS.....	434
7.13.5.	Procedimientos GPRS.....	437
	7.13.5.1. Clases de estaciones móviles GPRS.....	437
	7.13.5.2. Gestión de la movilidad en GPRS	439
	7.13.5.3. Procedimientos MM: Registro y desre-	
	gistro	441
	7.13.5.4. Gestión de localización.....	442
	7.13.5.5. Activación del contexto PDP.....	443
7.13.6.	Calidad de servicio en GPRS	446

7.13.7.	Canales GPRS	447
7.13.7.1.	Canales lógicos	447
7.13.7.2.	Funciones básicas de los canales lógicos ...	448
7.13.7.3.	Configuraciones de canales lógicos	450
7.13.7.4.	Canales físicos y multitransmisión en GPRS	451
7.13.8.	Modos de operación de red GPRS	452
7.13.9.	Acceso a la red GPRS	453
7.13.10.	Asignación y compartición de recurso radio	454
7.13.11.	Estructura de protocolos de la interfaz radio	458
7.13.12.	Esquemas de codificación	459
7.13.13.	Cálculo de caudales en GPRS	464
7.13.13.1.	Caudales teóricos	464
7.13.13.2.	Caudales reales	465
7.13.14.	Procedimientos radio	467
7.13.15.	Dimensionamiento radio GPRS	470
Capítulo 8.	SISTEMA UMTS	475
8.1.	Introducción	475
8.2.	Servicios de UMTS	477
8.3.	Arquitectura del sistema UMTS	478
8.3.1.	Consideraciones generales	478
8.3.2.	Núcleo de Red	481
8.3.3.	Red de acceso radio	483
8.3.4.	Características principales de UTRA	484
8.3.5.	Descripción de las funciones de UTRA	485
8.4.	Arquitectura de protocolos de la interfaz radio	486
8.4.1.	Arquitectura funcional	486
8.4.2.	Canales lógicos	489
8.4.3.	Canales de transporte	490
8.4.4.	Canales físicos e indicadores	491
8.5.	Correspondencias entre canales	492
8.5.1.	Correspondencia entre canales lógicos, de transporte y físicos	493
8.5.2.	Combinación de canales de transporte	493
8.5.3.	Codificación y multiplexación	495
8.6.	Recursos para el acceso radio en UMTS	498
8.6.1.	Portadoras RF	498
8.6.2.	Tramas Temporales	499
8.6.3.	Códigos	503
8.6.4.	Códigos ortogonales	503
8.6.5.	Códigos de aleatorización	505
8.6.6.	Codificación de canal	506
8.6.7.	Modulación	507

8.6.8.	Potencia de RF	507
8.6.9.	Estructura celular	508
8.6.10.	Sistemas de antenas.....	508
8.6.11.	Diversidad	509
8.7.	Descripción de los canales físicos	510
8.7.1.	Canal de Sincronización SCH.....	510
8.7.2.	Canal piloto común CPICH	512
8.7.3.	Canal común primario P-CCPCH.....	512
8.7.4.	Canal de acceso PRACH.....	513
8.7.5.	Canal de indicación de adquisición AICH	516
8.7.6.	Canal común secundario S-CCPCH	517
8.7.7.	Canales físicos ascendentes DPDCH y DPCCH.....	518
8.7.8.	Canal físico dedicado descendente DPDCH y DPCCH	519
8.7.9.	Canal indicador de aviso PICH.....	520
8.7.10.	Asignación de códigos	521
8.8.	Temporización entre canales físicos	523
8.9.	Conexión y acceso a la red	525
8.10.	Capacidad y cobertura en UMTS	526
8.11.	Especificaciones radio del equipo de usuario, UE.....	528
8.11.1.	Introducción	528
8.11.2.	Características del transmisor	528
8.11.3.	Características del receptor	530
8.11.4.	Calidad de funcionamiento	531
Capítulo 9. SISTEMAS HSDPA Y HSUPA.....		535
9.1.	Introducción.....	535
9.2.	HSDPA	535
9.2.1.	Características generales	535
9.2.2.	Canales físicos. Ensanchamiento espectral.....	537
9.2.3.	Modulación y codificación de canal. Procesado de señal en la capa física.....	540
9.2.4.	Gestión de recursos radio.....	542
9.2.4.1.	HARQ con combinación de retransmi- siones	542
9.2.4.2.	Categorías de terminales.....	542
9.2.4.3.	Adaptación de modulación y codifica- ción al estado del canal radio.....	544
9.2.4.4.	Planificación de usuarios dependiente del estado del canal radio	548
9.2.4.5.	Traspaso.....	549
9.2.5.	Evolución de HSDPA.....	549
9.3.	HSUPA	550

9.3.1.	Características generales	550
9.3.2.	Canales físicos.....	551
9.3.3.	Procesado de señal en la capa física.....	555
9.3.4.	Gestión de recursos radio.....	555
9.3.4.1.	Categorías de terminales.....	556
9.3.4.2.	HARQ con combinación de retransmisiones	556
9.3.4.3.	Planificación de usuarios	557
9.3.4.4.	Tipos de asignación	558
9.3.4.5.	Elección de la tasa binaria (formato de transporte).....	559
9.3.4.6.	Control de carga.....	560
Capítulo 10.	SISTEMA LTE.....	561
10.1.	Introducción.....	561
10.2.	Arquitectura e interfaces.....	564
10.3.	Interfaz radio	565
10.4.	Estructura de la capa física	569
10.5.	Señales físicas.....	574
10.6.	Canales físicos	581
10.6.1.	Introducción	581
10.6.2.	Canales físicos ascendentes	582
10.7.	Procesado de señal en transmisión LTE	603
10.8.	Planificación de usuarios	605
10.8.1.	Introducción	605
10.8.2.	Adaptación del enlace	607
10.8.3.	Indicador de calidad del canal CQI.....	608
10.9.	Asignación de recursos.....	609
10.9.1.	Introducción	609
10.9.2.	Asignación de recursos en enlace descendente.....	610
10.9.3.	Asignación de recursos en enlace ascendente.....	610
10.10.	Capacidad normalizada: TBS	611
10.11.	Categorías de terminales.....	616
10.12.	Características radio en LTE.....	617
10.12.1.	Bandas de frecuencias.....	617
10.12.2.	Cobertura de enlaces LTE	618
10.12.3.	Balances de enlaces en LTE.....	622
10.13.	Medidas de radio	626
10.14.	Sistema LTE-A	629
10.14.1.	Introducción	629
10.14.2.	Agregación de portadoras	630
10.14.3.	Transmisión multipunto coordinada CoMP	633
10.14.4.	Repetidores.....	635

Capítulo 11. COMUNICACIONES INALÁMBRICAS: DECT, Wi-Fi Y WiMAX	637
11.1. Introducción.....	637
11.2. Sistema DECT	639
11.2.1. Características generales	639
11.2.2. Modelo de referencia del DECT	640
11.2.3. Arquitectura de protocolos de DECT.....	641
11.2.4. Capa física de DECT.....	642
11.2.4.1. Banda de frecuencias y estructura de tra- mas.....	643
11.2.4.2. Paquetes físicos.....	645
11.2.4.3. Canales físicos	647
11.2.4.4. Canales lógicos.....	648
11.2.5. Características radioeléctricas del DECT	649
11.3. Sistema Wi-Fi	650
11.3.1. Introducción	650
11.3.2. Características generales de redes Wi-Fi	653
11.3.2.1. Tipos de redes.....	653
11.3.2.2. Servicios de red	654
11.3.2.3. Bandas de frecuencias	655
11.3.2.4. Control de acceso al medio.....	655
11.3.3. Modalidades de capa física de redes Wi-Fi.....	656
11.3.3.1. Modalidades del estándar inicial y de 802.11b	656
11.3.3.2. Modalidades 802.11a y 802.11g.....	657
11.3.3.3. Modalidades 802.11n, 802.11ac y 802.11ad	659
11.4. Sistema WiMAX	660
11.4.1. Introducción	660
11.4.2. Estandarización de WiMAX	661
11.4.3. Arquitectura de red.....	662
11.4.4. La capa MAC de IEEE 802.16.....	663
11.4.5. La capa física de WiMAX.....	664
11.4.5.1. OFDM.....	665
11.4.5.2. Características de transmisión	666
11.4.5.3. Capa física OFDMA.....	666
Capítulo 12. COMUNICACIONES MÓVILES POR SATÉLITE	669
12.1. Introducción.....	669
12.2. Órbitas y constelaciones	670
12.3. Propagación.....	672
12.3.1. Introducción	672
12.3.2. Efectos ionosféricos	673

12.3.3. Efectos de propagación que afectan al servicio móvil terrestre	674
12.4. Ejemplos de sistemas.....	680
12.4.1. Inmarsat.....	680
12.4.2. Thuraya	681
12.4.3. Iridium.....	681
12.4.4. Globalstar.....	682
Apéndice I.....	683
Apéndice II.....	713
Bibliografía	715