ÍNDICE

PRÓLOGO A LA TERCERA EDICIÓN 21

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES 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 COMUNICACIONES 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 π/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. Caracterizacion 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 multitrayecto: 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 respecto 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 convencionales 239
5.3.2.2. Concepto de combinación de retransmisiones 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 adaptación 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 importantes 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 comunicaciones 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 isótropa 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 desregistro 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 multitramas 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 retransmisiones 542
9.2.4.2. Categorías de terminales 542
9.2.4.3. Adaptación de modulación y codificación 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 tramas 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