

# Contenido

Los números entre paréntesis después de los títulos de sección identifican secciones previas que contienen material mínimo requerido. El símbolo ★ identifica material opcional.

## Capítulo 1

### Introducción 1

- 1.1 Elementos y limitaciones de los sistemas de comunicación 2
  - Información, mensajes y señales 2
  - Elementos de un sistema de comunicación 3
  - Limitaciones fundamentales 5
- 1.2 Modulación y codificación 6
  - Métodos de modulación 6
  - Beneficios y aplicaciones de la modulación 7
  - Métodos y beneficios de la codificación 10
- 1.3 Perspectiva histórica e impacto social 11
  - Perspectiva histórica 12
  - Impacto social 14
- 1.4 Prospecto 15

## Capítulo 2

### Señales y espectros 17

- 2.1 Espectros de líneas y series de Fourier 19
  - Fasores y espectros de línea 19
  - Señales periódicas y potencia promedio 23
  - Series de Fourier 25
  - Condiciones de convergencia y el fenómeno de Gibbs 29
  - Teorema de potencia de Parseval 31
- 2.2 Transformadas de Fourier y espectros continuos (2.1) 33
  - Transformadas de Fourier 33
  - Señales simétricas y causales 37
  - Teorema de la energía de Rayleigh 40
  - Teorema de la dualidad 42
  - Cálculos de transformadas 44
- 2.3 Relaciones de tiempo y frecuencia (2.2) 44
  - Superposición 45
  - Retardo de tiempo y cambio de escala 45
  - Traslación y modulación de frecuencia 48
  - Diferenciación e integración 50
- 2.4 Convolución (2.3) 52

La integral de convolución 53

Teoremas de convolución 55

- 2.5 Impulsos y transformadas en el límite (2.4) 58
  - Propiedades del impulso unitario 58
  - Impulsos en frecuencia 61
  - Funciones escalón y signo 64
  - Impulsos en el tiempo 66

## Capítulo 3

### Transmisión y filtrado de señales 75

- 3.1 Respuesta de sistemas LIT (2.4) 76
  - La respuesta al impulso y la integral de superposición 77
  - Funciones de transferencia y respuesta en frecuencia 80
  - Análisis con diagramas de bloques 86
- 3.2 Distorsión de la señal en la transmisión (3.1) 89
  - Transmisión sin distorsión 89
  - Distorsión lineal 91
  - Compensación 94
  - Distorsión no lineal y compensación 97
- 3.3 Pérdidas de transmisión y decibeles (3.2) 99
  - Ganancia de potencia 99
  - Pérdidas en la transmisión y repetidores 101
  - Fibra óptica 102
  - Transmisión de radio ★ 106
- 3.4 Filtros y filtrado (3.3) 109
  - Filtros ideales 109
  - Limitación en banda y limitación en tiempo 111
  - Filtros reales 112
  - Respuesta al pulso y tiempo de subida 116
- 3.5 Filtros de cuadratura y transformada de Hilbert (3.4) 120
- 3.6 Correlación y densidad espectral (3.3) 124
  - Correlación de señales de potencia 124
  - Correlación de señales de energía 127
  - Funciones de densidad espectral 130

**Capítulo 4**

- Modulación lineal de OC 141**
- 4.1 Señales y sistemas pasabanda (3.4) 142  
 Convenciones para los mensajes analógicos 143  
 Señales pasabanda 144  
 Transmisión pasabanda 147
- 4.2 Modulación de amplitud de doble banda lateral (4.1) 152  
 Señales y espectros de AM 152  
 Señales y espectros de DSB 154  
 Modulación de tono y análisis fasorial 157
- 4.3 Moduladores y transmisores (4.2) 158  
 Moduladores de producto 158  
 Moduladores de ley cuadrática y balanceados 160  
 Moduladores de conmutación 162
- 4.4 Modulación de amplitud con banda lateral suprimida (3.5, 4.3) 164  
 Señales y espectros de SSB 164  
 Generación de SSB 167  
 Señales y espectros de VSB ★ 170
- 4.5 Conversión de frecuencia y demodulación (4.4) 172  
 Conversión de frecuencia 172  
 Detección síncrona 173  
 Detección de envolvente 176

**Capítulo 5**

- Modulación exponencial de OC 183**
- 5.1 Modulación de fase y de frecuencia (4.3) 184  
 Señales PM y FM 184  
 PM y FM de banda angosta 188  
 Modulación de tono 189  
 Modulación multitonal y periódica ★ 196
- 5.2 Ancho de banda de transmisión y distorsión (5.1) 199  
 Estimados del ancho de banda de transmisión 199  
 Distorsión lineal 202  
 Distorsión no lineal y limitadores 205
- 5.3 Generación y detección de FM y PM (4.5, 5.2) 208  
 FM directa y OCV 208  
 Moduladores de fase y FM indirecta 209  
 FM de onda triangular ★ 212  
 Detección de frecuencia 214
- 5.4 Interferencia (5.3) 219  
 Senoidales interferentes 219  
 Filtrado de desénfasis y preénfasis 221  
 Efecto de captura en FM ★ 224

**Capítulo 6**

- Muestreo y modulación de pulsos 231**
- 6.1 Teoría y práctica del muestreo (4.2) 232  
 Muestreo con cortador 232  
 Muestreo ideal y reconstrucción 237  
 Muestreo práctico y alias de frecuencia 240
- 6.2 Modulación de amplitud de pulsos (6.1) 245  
 Muestreo de tope plano y PAM 245
- 6.3 Modulación del tiempo de los pulsos (6.2) 248  
 Modulación de la duración y de la posición de los pulsos 248  
 Análisis espectral de la PPM ★ 251

**Capítulo 7****Sistemas de comunicación analógicos 257**

- 7.1 Receptores para modulación de OC (5.3) 258  
 Receptores superheterodinos 258  
 Receptores de conversión directa 262  
 Receptores de propósito especial 262  
 Especificaciones del receptor 264  
 Analizadores de espectro de exploración ★ 265
- 7.2 Sistemas de multiplexaje (5.3, 6.1) 266  
 Multiplexaje por división de frecuencia 266  
 Multiplexaje de portadora en cuadratura 271  
 Multiplexaje por división de tiempo 272  
 Diafonía y tiempos de guarda 276  
 Comparación de la TDB y la FDM 277
- 7.3 Lazos de sincronización de fase (PLL) (7.1) 278  
 Operación y enganche del PLL 278  
 Detección síncrona y sintetizadores de frecuencia 281  
 Modelos del PLL linealizados y detección de FM 285
- 7.4 Sistemas de televisión (7.1) 286  
 Señales de video, resolución y ancho de banda 287  
 Transmisores y receptores monocromáticos 292  
 Televisión a color 294  
 HDTV 299

**Capítulo 8**

- Probabilidad y variables aleatorias 311**
- 8.1 Probabilidad y espacio de muestras 312  
 Probabilidades y eventos 312  
 Espacio de muestras y teoría de la probabilidad 313  
 Probabilidad condicional e independencia estadística 317

- 8.2 Variables aleatorias y funciones de probabilidad (8.1) 320
  - Variables aleatorias discretas y la FDA 320
  - Variables aleatorias continuas y FDP 323
  - Transformaciones de variables aleatorias 327
  - FDP conjunta y FDP condicional 329
- 8.3 Promedios estadísticos (2.3, 8.2) 330
  - Medias, momentos y esperanza 331
  - Desviación estándar y desigualdad de Chebyshev 332
  - Esperanzas multivariantes 334
  - Funciones características ★ 336
- 8.4 Modelos probabilísticos (8.3) 337
  - Distribución binomial 337
  - Distribución de Poisson 338
  - FDP gaussiana 339
  - FDP de Rayleigh 342
  - Distribución gaussiana bivariable ★ 344

## Capítulo 9

### Señales aleatorias y ruido 351

- 9.1 Procesos aleatorios (3.6, 8.4) 352
  - Promedios del conjunto y funciones de correlación 353
  - Procesos estacionarios y ergódicos 357
  - Procesos gaussianos 362
- 9.2 Señales aleatorias (9.1) 362
  - Espectro de potencia 362
  - Superposición y modulación 367
  - Señales aleatorias filtradas 368
- 9.3 Ruido (9.2) 371
  - Ruido térmico y potencia disponible 372
  - Ruido blanco y ruido filtrado 375
  - Ancho de banda equivalente del ruido 378
  - Mediciones del sistema mediante el uso de ruido blanco ★ 380
- 9.4 Transmisión de señales de banda base con ruido (9.3) 381
  - Ruido aditivo y razones señal-a-ruido 382
  - Transmisión de señales analógicas 383
- 9.5 Transmisión de pulsos de banda base con ruido (9.4) 386
  - Mediciones de pulsos en ruido 386
  - Detección de pulsos y filtros adaptados 388

## Capítulo 10

### Ruido en sistemas de modulación analógicos 397

- 10.1 Ruido pasabanda (4.4, 9.2) 398

- Modelos de sistemas 399
  - Componentes en cuadratura 401
  - Envolvente y fase 403
  - Funciones de correlación ★ 404
- 10.2 Modulación lineal de OC con ruido (10.2) 406
  - Detección síncrona 407
  - Detección de envolvente y efecto de umbral 409
- 10.3 Modulación exponencial de OC con ruido (5.3, 10.2) 412
  - Ruido de posdetección 412
  - $S/N$  en el destino 416
  - Efecto de umbral en FM 418
  - Extensión del umbral mediante realimentación de FM ★ 421
- 10.4 Comparación de sistemas de modulación de OC (9.4, 10.3) 422
- 10.5 Desempeño del lazo de sincronización de fase con ruido (7.3, 10.1) 425
- 10.6 Modulación analógica de pulsos con ruido (6.3, 9.5) 426
  - Razón señal-a-ruido 426
  - Efecto de umbral de pulso falso 429

## Capítulo 11

### Transmisión digital en la banda base 435

- 11.1 Señales y sistemas digitales (9.1) 437
  - Señales PAM digitales 437
  - Limitaciones en la transmisión 440
  - Espectros de potencia de la PAM digital 443
  - Conformación espectral por precodificación ★ 446
- 11.2 Ruido y errores (9.4, 11.1) 448
  - Probabilidades de error binario 448
  - Repetidores regenerativos 453
  - Filtrado adaptado 454
  - Probabilidades de error  $M$ -ario 457
- 11.3 Sistemas de PAM digitales de banda limitada (11.2) 461
  - Formación de pulsos de Nyquist 461
  - Filtros terminales óptimos 464
  - Compensación (ecualización) 468
  - Codificación correlativa ★ 470
- 11.4 Técnicas de sincronización (11.2) 476
  - Sincronización de bits 477
  - Cifradores y generadores de secuencia de PN 479
  - Sincronización de cuadro 484

**Capítulo 12****Técnicas de digitalización para mensajes analógicos y redes de computadoras 493**

- 12.1 Modulación por codificación de pulsos (6.2, 11.1) 495
  - Generación y reconstrucción de PCM 495
  - Ruido de cuantización 499
  - Cuantización no uniforme y expansión ★ 501
- 12.2 PCM con ruido (11.2, 12.1) 504
  - Ruido de decodificación 505
  - Umbral de error 507
  - La PCM *versus* la modulación analógica 508
- 12.3 Modulación delta y codificación predictiva (12.2) 510
  - Modulación delta 510
  - Modulación delta-sigma 516
  - Modulación delta adaptiva 516
  - PCM diferencial 518
  - Síntesis de voz por LPC 520
- 12.4 Grabación digital de audio (12.3) 522
  - Grabación de CD 523
  - Reproducción de CD 525
- 12.5 Multiplexaje digital (12.1) 526
  - Multiplexores y jerarquías 527
  - Líneas digitales de abonado 530
  - Red Digital de Servicios Integrados 532
  - Red Óptica Síncrona 533
  - Multiplexores de datos 535
- 12.6 Redes de computadoras (12.5) 537
  - Interconexión de Sistemas Abiertos 538
  - Protocolo de Control de Transmisiones/Protocolo de Internet 539

**Capítulo 13****Codificación y encriptación de canales 547**

- 13.1 Detección y corrección de errores (11.2) 549
  - Códigos de repetición y de verificación de paridad 549
  - Intercalación 550
  - Vectores de códigos y distancia de Hamming 552
  - Sistemas de FEC 553
  - Sistemas de ARQ 556
- 13.2 Códigos de bloques lineales (13.1) 560
  - Representación matricial de códigos de bloques 560
  - Decodificación de síndrome 564

- Códigos cíclicos 567
- Códigos *M*-arios ★ 573
- 13.3 Códigos convolucionales (13.2) 573
  - Codificación convolucional 573
  - Distancia libre y ganancia de codificación 580
  - Métodos de decodificación 585
  - Códigos turbo 592
- 13.4 Encriptación de datos (13.1) 594
  - Estándar de encriptación de datos 598
  - Sistema Rivest-Shamir-Adleman 602

**Capítulo 14****Transmisión digital pasabanda 611**

- 14.1 Modulación digital de OC (4.5, 5.1, 11.1) 612
  - Análisis espectral de señales digitales pasabanda 613
  - Métodos de modulación de amplitud 614
  - Métodos de modulación de fase 617
  - Métodos de modulación de frecuencia 619
  - Modulación por desplazamiento mínimo ★ 622
- 14.2 Sistemas binarios coherentes (11.2, 14.1) 626
  - Detección binaria óptima 626
  - OOK, BPSK y FSK coherentes 631
  - Temporización y sincronización 633
- 14.3 Sistemas binarios no coherentes (14.2) 634
  - Envolvente de una senoidal más ruido pasabanda 634
  - OOK no coherente 636
  - FSK no coherente 638
  - PSK diferencialmente coherente 640
- 14.4 Sistemas de portadora en cuadratura y *M*-arios (14.2) 644
  - Sistemas de portadora en cuadratura 644
  - Sistemas de PSK *M*-arios 646
  - Sistemas QAM *M*-arios 650
  - Comparación de los sistemas de modulación digital 653
- 14.5 Modulación codificada por entramado 655
  - Fundamentos de la TCM 656
  - Decisiones difíciles *versus* decisiones fáciles 664
  - Módems 665

**Capítulo 15****Sistemas de espectro disperso 671**

- 15.1 Espectro disperso de secuencia directa (14.2) 672
  - Señales de DSS 673
  - Desempeño del DSS en presencia de interferencia 676
  - Acceso múltiple 678

15.2	Espectro disperso por salto de frecuencia (15.1)	679	
	Señales de FH-SS	680	
	Desempeño del FH-SS en presencia de interferencia	682	
15.3	Codificación (15.1)	684	
15.4	Sincronización (7.3)	689	
	Adquisición	689	
	Seguimiento	691	
15.5	Sistemas de telefonía inalámbrica (15.1)	692	
	Sistemas de telefonía celular	693	
	Sistemas de comunicación personal	693	
<b>Capítulo 16</b>			
<b>Teoría de la información y detección 696</b>			
16.1	Medida de la información y codificación fuente (12.1)	699	
	Medida de la información	700	
	Entropía y velocidad de la información	701	
	Codificación para un canal discreto sin memoria	705	
	Codificación predictiva para fuentes con memoria	709	
16.2	Transmisión de información en canales discretos (16.1)	713	
	Información mutua	713	
	Capacidad de los canales discretos	717	
	Codificación para canal simétrico binario ★	719	
16.3	Canales continuos y comparación de sistemas (16.2)	722	
	Información continua	722	
	Capacidad de los canales continuos	725	
	Sistemas ideales de comunicación	727	
	Comparaciones de sistemas	731	
16.4	Espacio de señales	735	
	Señales como vectores	735	
	El procedimiento Gram-Schmidt	738	
16.5	Detección digital óptima (16.3, 16.4)	740	
	Detección óptima y receptores MAP	741	
	Probabilidades de error	747	
	Selección de señal y señalización ortogonal ★	751	
<b>Apéndice: Ruido de circuitos y sistemas (9.4) 760</b>			
	Ruido de circuitos y dispositivos	761	
	Ruido de amplificadores	768	
	Cálculos de ruido del sistema	773	
	Sistemas de repetidores por cable	777	
<b>Tablas 780</b>			
	T.1 Transformadas de Fourier	780	
	T.2 Serie de Fourier	782	
	T.3 Relaciones matemáticas	784	
	T.4 Función Sinc	787	
	T.5 Funciones de probabilidad	788	
	T.6 Probabilidades gaussianas	790	
	T.7 Glosario de notaciones	792	
<b>Soluciones a los ejercicios 794</b>			
<b>Respuestas a los problemas seleccionados 825</b>			
<b>Lecturas complementarias 832</b>			
<b>Referencias 835</b>			
<b>Índice 839</b>			