

Título de la obra original:
Digital Communications
Design for the Real World

© **Addison Wesley Longman Limited**, 1999

“This translation of Digital Communications: Design for the Real World, First Edition, is published by arrangement with Pearson Education Limited”.

Autor:
Andy Bateman

Traducción:
Francisco Palomera Abegón

Coordinador editorial:
Carles Parcerisas Civit

Reservados todos los derechos de publicación, reproducción, préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión del uso de este ejemplar de la presente edición en español, por

© **MARCOMBO S.A. 2003**
Gran Via de les Corts Catalanes, 594
08007 Barcelona

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del "Copyright", bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, así como la exportación e importación de esos ejemplares para su distribución en venta, fuera del ámbito de la Unión Europea.

ISBN: 84-267-1337-8
ISBN: 0-201-34301-0, edición original

Impreso en España
Printed in Spain

Índice

Prefacio	XV
¿A quién está dirigido este libro?	XV
¿Qué conocimientos previos se requieren?.....	XV
¿En qué difiere el material de este libro de otros textos de comunicaciones digitales?.....	XV
¿Dónde se ha originado el material?.....	XVI
El autor	XVI
Información para instructores/formadores.....	XVII
¿Qué opina de este libro?	XVII
Agradecimientos del autor.....	XVII
Agradecimientos de los editores.....	XVIII
Advertencias sobre marcas registradas.....	XVIII
Cómo utilizar libro y CD combinados	XIX
Diferencias entre el libro impreso y el CD.....	XIX
Requisitos del sistema	XX
Instalación y arranque del libro electrónico.....	XX
Navegación por el libro electrónico	
Botones en el lado izquierdo de la pantalla	XXI
Botones en la parte inferior de la pantalla	XXIII
Características en la página y convenciones de visualización	XXIII
1. Materia básica	1
1.1 Representación temporal/frecuencial de señales digitales	2
Serie de Fourier	3
<i>En profundidad: Desarrollo en serie de Fourier</i>	3
El dominio frecuencial.....	4
Espectro de un tren periódico de impulsos.....	4
Espectro de un impulso de datos	9
Espectro de un flujo de datos binario en banda base.....	9
Factores que afectan al ancho de banda de la señal	10
Transformación de Fourier	10
<i>En profundidad: Transformación de Fourier</i>	11
1.2 Relaciones trigonométricas	11
Proceso mezclador básico.....	11
Procesos mezcladores complejos.....	14

Modulador vectorial	14
<i>En profundidad: Identidades trigonométricas útiles</i>	<i>16</i>
1.3 Redes de comunicaciones y protocolos de señalización	16
¿Qué es una red?	16
Configuración típica de red	17
Jerarquía de red.....	17
Normas de transmisión	18
<i>En profundidad: Estructura en trama y jerarquía de multiplexado para telefonía europea ITU (CCITT).....</i>	<i>18</i>
Red Digital de Servicios Integrados (RDSI).....	19
¿Qué es un protocolo?	20
<i>En profundidad:El protocolo RS232</i>	<i>20</i>
El modelo OSI de siete capas.....	21
Tipos de redes: funcionamiento de red conmutada por circuito y por paquetes.....	22
Administración de red	22
Capa de enlace de red.....	23
Comunicaciones síncrona/asíncrona.....	23
Transmisión síncrona	23
Transmisión asíncrona.....	23
Formato de carácter ASCII.....	24
1.4 Definición de términos	25
Características del tipo de mensaje.....	25
Analógico	25
Digital.....	25
Elementos de un enlace de comunicaciones	25
Transmisor.....	25
Canal de transmisión	25
Receptor	26
Formas de onda unipolares frente a bipolares	26
Orígenes de la degradación del enlace.....	26
Distorsión	26
Interferencia	27
Ruido	27
Protocolos de transmisión.....	28
Símplex	28
Semidúplex.....	28
Dúplex completo	28
2. Fundamentos de la transmisión de datos	31
2.1 Factores que afectan al diseño del sistema	32
Limitaciones tecnológicas	32
Disponibilidad de software y hardware.....	32
<i>En profundidad: Procesado digital de señales</i>	<i>33</i>

Consumo de potencia	34
Tamaño de los componentes	34
Regulaciones y normativas gubernamentales	34
Realidades comerciales.....	35
2.2 Fundamentos de la transmisión de datos	35
¿Cómo puede fluir la información rápidamente?	35
Métodos de comunicación	36
Señalización binaria	36
Señalización multinivel	36
Funcionamiento con símbolo multinivel	37
Compromiso entre ancho de banda y ruido	37
Velocidad de transferencia de información	38
Velocidad de símbolos (velocidad en baudios)	38
Rendimiento del ancho de banda	39
2.3 Señalización multinivel (señalización M-aria)	39
Relación entre bits y símbolos	39
Ejemplo: señalización 8-aria.....	40
2.4 Cálculo de la capacidad del canal	41
Limitación debida al ancho de banda finito.....	41
Ancho de banda de transmisión mínimo.....	42
Restricción de la capacidad del canal debido al ruido –el teorema Shannon- Hartley.....	42
Rendimiento de la potencia y del ancho de banda	44
Representación gráfica	45
3. Transmisión de datos en banda base	49
3.1 Introducción.....	50
3.2 Interferencia intersímbolo (ISI)	50
El problema de la interferencia intersímbolo.....	50
Conformación de impulsos para ISI cero: filtrado de canal de Nyquist	51
Consecución de una respuesta de canal de Nyquist.....	52
Filtrado de Nyquist – Ejemplo: aplicación de radiocomunicación celular ..	52
3.3 Diagramas en ojo	53
Generación de diagramas en ojo.....	53
Diagnóstico utilizando el diagrama en ojo	53
Ejemplo de diagrama en ojo complejo	54
3.4 Filtrado en coseno elevado	55
Familia de filtros en coseno elevado	55
Respuesta a los impulsos del filtro en coseno elevado.....	56
<i>En profundidad: Función de transferencia y respuesta a los impulsos de un filtro en coseno elevado</i>	<i>56</i>

Diagramas en ojo para datos filtrados en coseno elevado	56
Filtro en coseno elevado raíz	57
Realización de filtros de Nyquist digitales	57
<i>En profundidad: Respuesta a los impulsos de un filtro en coseno elevado raíz</i>	<i>58</i>
Precauciones con diagramas en ojo.....	58
Recuperación de la temporización de símbolos	59
Circuitos de temporización de símbolos	59
Resumen: elección de α	61
3.5 Filtrado adaptado	61
Recuperación de símbolos desde el ruido.....	61
Concepto de filtro óptimo (adaptado).....	62
Diseño de un filtro adaptado teniendo en cuenta la ISI	63
<i>En profundidad: Criterios para filtrado adaptado en AWGN.....</i>	<i>63</i>
Comportamiento de la proporción de bits de error (BER) para sistemas de datos en banda base.....	65
Comportamiento de la BER para detección con filtro adaptado.....	65
<i>En profundidad: Probabilidad de error de símbolos para detección de datos unipolares en banda base binaria</i>	<i>66</i>
Símbolos unipolares frente a bipolares.....	67
<i>En profundidad: Probabilidad de error de símbolos para detección de datos bipolares en banda base binaria</i>	<i>68</i>
Comportamiento de la BER para señalización M-aria	69
Proporción de bits de error frente a proporción de símbolos de error	70
Codificación de Gray.....	71
3.6 Señalización de respuesta parcial	71
Señalización duobinaria.....	71
<i>En profundidad: Cálculo de la respuesta a los impulsos y de la respuesta de frecuencia para señalización duobinaria</i>	<i>72</i>
Señalización duobinaria modificada.....	74
<i>En profundidad: Cálculo de la respuesta a los impulsos y de la respuesta de frecuencia para señalización duobinaria modificada</i>	<i>74</i>
4. Orígenes y ejemplos de degradación de canal	77
4.1 Introducción	78
4.2 Distorsión de ganancia, fase y retardo de grupo	78
Distorsión de ganancia – filtros	78
Distorsión de ganancia – amplificadores	79
<i>En profundidad: Transmisores/amplificadores lineales.....</i>	<i>79</i>
Distorsión de ganancia – el canal	83
Distorsión de fase – filtros	84
Retardo de grupo – filtros	84
Distorsión de fase – amplificadores.....	85

Distorsión de fase – el canal	85
Errores de frecuencia	86
Error del oscilador local	86
Desplazamiento Doppler	87
<i>En profundidad: Desplazamiento Doppler</i>	87
4.3 Interferencia y ruido	88
Fuentes de interferencia	88
Reducción de la interferencia	89
Fuentes de ruido.....	89
Ruido térmico.....	90
Ruidos de granalla, de parpadeo y atmosférico	90
Características del ruido	91
4.4 El canal telefónico	91
Canales acoplados en c.a.	91
NRZ frente a codificación Manchester	92
Rendimiento del ancho de banda de datos codificados	93
Codificación de datos y canal telefónico.....	94
4.5 El canal de radiocomunicaciones	94
Propagación no guiada.....	94
Distorsión multitrayectoria	95
Desvanecimiento multitrayectoria	95
Desvanecimiento plano de frecuencia frente a desvanecimiento selectivo de frecuencia	96
Desvanecimiento multitrayectoria – el problema del dominio temporal	96
Recepción con desvanecimiento multitrayectoria	97
Sondeo de referencia	97
<i>En profundidad: Corrección del desvanecimiento basada en un tono piloto</i>	97
Transmisión en paralelo	98
Dispersión espectral	99
Ecuilibradores de canal	99
Antena direccional	100
Predicción de la distorsión multitrayectoria	101
Cambios de la propagación con la frecuencia de funcionamiento.....	101
5. Modulación digital de paso de banda	103
5.1 Introducción	104
5.2 Manipulación por desplazamiento de amplitud (ASK)	105
¿Qué es ASK?.....	105
Simetría en ASK.....	105
Ocupación espectral de ASK: espectro de datos ASK.....	106
Generación de señales moduladas ASK	107

ASK de ancho de banda limitado	108
Método de filtrado de paso de banda.....	108
Método de filtrado en banda base	108
Detección no coherente	109
Detección coherente	109
<i>En profundidad: Ejemplo de mezclador “lineal” integrado</i>	110
Detección coherente frente a detección no coherente.....	112
Recuperación de portadora para ASK	114
Filtrado adaptado para ASK	114
Recuperación de la temporización de símbolos.....	115
Comportamiento de BER para ASK.....	115
Diagramas de constelación	116
5.3 Manipulación por desplazamiento de frecuencia (FSK).....	117
Formas de onda FSK	117
Generación FSK	117
<i>En profundidad: Osciladores controlados por tensión</i>	118
El modulador vectorial	118
Espectro de FSK.....	119
Espectro de CPFSK	119
<i>En profundidad: Ejemplo de modulador en cuadratura (vectorial)</i> <i> integrado</i>	120
<i>En profundidad: Espectro de las formas de onda de manipulación por</i> <i> desplazamiento de frecuencia</i>	122
FSK filtrada	123
Detección no coherente FSK	123
Detección no coherente FSK basada en PLL.....	124
Detección coherente FSK	125
Comportamiento de BER para FSK.....	126
5.4 Manipulación por desplazamiento de fase (PSK).....	127
Principio de la PSK.....	127
Ocupación espectral para PSK.....	127
Generación PSK	127
El efecto del filtrado sobre la forma de onda PSK.....	128
Detección de PSK.....	128
Recuperación de portadora para PSK coherente.....	129
El bucle de Costas.....	131
Ambigüedad de fase en recuperación de portadora PSK.....	131
Codificación de datos diferencial	132
Decodificación de datos diferencial.....	132
PSK diferencial (DPSK).....	133
Recuperación de la temporización de símbolos para PSK.....	134
Diagrama de constelación para PSK.....	136
Comportamiento de BER para PSK.....	136

5.5 Comparación de esquemas de modulación binaria	137
Comportamiento de BER relativo.....	137
Igual energía media del símbolo	137
Igual energía de pico del símbolo.....	138
6. Modulación digital multinivel	141
6.1 Introducción	142
6.2 Manipulación por desplazamiento de amplitud M-aria (ASK M-aria)	142
Realización de ASK M-aria.....	142
Comportamiento de ASK M-aria.....	143
6.3 Manipulación por desplazamiento de frecuencia M-aria (FSK M-aria) ..	143
Aplicación FSK M-aria.....	143
Señalización ortogonal	144
Propiedades de los símbolos ortogonales.....	144
Detección FSK ortogonal	145
Comportamiento de BER para FSK M-aria ortogonal	145
<i>En profundidad: Probabilidad de error de símbolo para FSK M-aria</i> <i>ortogonal</i>	146
6.4 Manipulación por desplazamiento de fase M-aria (PSK M-aria)	146
Manipulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK)	146
Realización de QPSK – modulador	147
Realización de QPSK – demodulador.....	147
Comportamiento de los bits de error para QPSK.....	147
Comportamiento de los símbolos de error para QPSK	148
QPSK diferencial (DQPSK)	148
Comportamiento de BER para DQPSK	149
QPSK $\pi/4$	149
QPSK desplazada (OQPSK).....	150
Espectro de PSK M-aria	151
Comportamiento de PSK M-aria	151
6.5 Manipulación de amplitud y fase combinadas (QAM/APK)	152
Introducción.....	152
Generación QAM	152
Detección QAM.....	153
QAM M-aria frente a PSK M-aria.....	154
Comportamiento de BER para QAM	156
Manipulación de amplitud y fase M-aria (APK M-aria).....	156
Codificación Gray	157
6.6 Comportamiento relativo de los formatos de modulación de paso de banda multinivel	157
Curvas de símbolos de error para formatos M-arios.....	157

El límite de Shannon – ¿cuánto podemos aproximarnos?	158
Tabla de características de modem telefónicos CCITT	158
7. Teoría y práctica de la codificación	161
7.1 Codificación de fuente	162
Introducción.....	162
Codificación de la forma de onda – convertidores A/D	163
Muestreo de Nyquist.....	163
Teorema de Nyquist de muestreo – “aliasing”	164
Margen dinámico.....	166
Ruido de cuantificación	166
<i>En profundidad: Cálculo de la relación señal/ruido de cuantificación</i>	<i>167</i>
Compansión	167
Codificación de voz	169
<i>En profundidad: Típico codec integrado para digitalización de señal telefónica</i>	<i>170</i>
Codificación inteligente de fuente	172
7.2 Codificación de canal	173
Introducción.....	173
Tipos de funcionamiento ARQ.....	173
Paridad.....	174
Tipos de codificación FEC	175
7.3 Codificación por bloques	175
Fundamentos de la codificación por bloques.....	175
Analogía de la codificación por bloques.....	175
Rendimiento de la codificación	176
Códigos de Hamming – ejemplo de un código por bloques	176
Distancia de Hamming	177
Comportamiento BER para un código de Hamming (7, 4)	178
Códigos de Hamming de orden superior.....	178
Complejidad de realización	178
7.4 Codificación por bloques avanzada	179
Familias de códigos por bloques.....	179
Entrelazado	179
Realización.....	180
Códigos de Reed-Solomon (RS).....	180
7.5 Codificación convolucional	181
Introducción.....	181
Decodificación de decisión soft.....	181
Diagramas “trellis”	182
Decodificación de decisión soft frente a hard.....	182

7.6 Codificación y modulación combinadas	183
Introducción.....	183
Modulación codificada “trellis” (TCM)	183
Cuestiones prácticas con TCM	183
TCM y el límite de Shannon	184
Codificación de fuente, canal y modulación – completa	184
8. Técnicas de modulación digital multiusuario	187
8.1 Introducción	188
8.2 Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA)	188
Funcionamiento del sistema básico	188
Funcionamiento del FDMA en radiocomunicaciones	189
Control de potencia en sistemas FDMA de radiocomunicaciones	189
Ventajas de FDMA.....	190
Desventajas de FDMA.....	191
Multiplexado por división de la longitud de onda	191
8.3 Acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA)	192
Funcionamiento del sistema básico	192
TDMA en un entorno de radiocomunicaciones	193
Ejemplo de un sistema TDMA	193
Ventajas de funcionamiento TDMA.....	194
Desventajas de funcionamiento TDMA	195
8.4 Acceso múltiple por división de código (CDMA)	196
Sistemas CDMA.....	196
CDMA por salto de frecuencia (FH-CDMA)	196
Ejemplo de CDMA por salto de frecuencia.....	197
CDMA de secuencia directa.....	197
Ejemplo de CDMA de secuencia directa	198
<i>En profundidad: Secuencias pseudoaleatorias</i>	199
Ventajas de CDMA	201
Desventajas de CDMA	201
8.5 Sistemas de acceso múltiple combinados	202
Ejemplos de combinaciones FDMA/TDMA	202
Ejemplos de combinaciones FDMA/CDMA y FDMA/FDMA.....	202
Glosario	205
Referencias	209
Índice alfabético	211