

Obsah

Předmluva	xiii
1 Úvod	1
I Přehled vybraných partií teoretických základů	5
2 Signály a soustavy	7
2.1 Signály ve spojitém čase	7
2.1.1 Charakteristiky v časové oblasti	7
2.1.2 Charakteristiky na množině realizací	9
2.1.3 Průměrné charakteristiky	11
2.2 Signály v diskrétním čase	13
2.2.1 Charakteristiky v časové oblasti	13
2.2.2 Charakteristiky na množině realizací	13
2.2.3 Průměrné charakteristiky	14
2.3 Rozklad signálů v systému báзовých funkcí	14
2.3.1 Hilbertův prostor	14
Prostor \mathbb{L}_2	15
Euklidovský prostor \mathbb{E}_N	15
2.3.2 Rozklad signálů v systému báзовých funkcí	16
2.3.3 Signálový prostor	16
2.3.4 Vzorkování	17
2.3.5 Rozklad náhodných signálů — Karhunenova-Loèevova věta	17
Karhunenova-Loèevova věta	18
Rozklad stacionárních periodických procesů	18
Rozklad stacionárního procesu na nekonečném intervalu	19
Rozklad signálů s nekonečnou energií	19
Rozklad gaussovského procesu s konečnou energií	19
Rozklad komplexní obálky bílého gaussovského šumu	19
2.4 Komplexní obálka	20
2.4.1 Definice komplexní obálky	20
2.4.2 Vlastnosti komplexní obálky	22
2.4.3 Charakteristiky komplexní obálky získané z charakteristik reálného signálu	24

2.4.4	Charakteristiky reálného signálu získané z charakteristik komplexní obálky	26
2.4.5	Komplexní obálka signálu s omezenou šířkou pásma	27
2.4.6	Ekvivalentní operace pro komplexní obálku	28
	Lineární časově invariantní systém	28
	Nelinearita bez paměti	30
	Nelinearita v kvadraturních složkách	31
2.4.7	Ekvivalentní komplexní obálka bílého šumu ve frekvenčně omezených systémech	32
	Poznámky	34

II Digitální modulátor 35

3	Digitální modulace — obecné vlastnosti	37
3.1	Obecná definice digitální modulace	37
3.1.1	Základní podoba definice pro skalární datové symboly a skalární modulaci	37
	Digitální modulátor	37
	Paměť modulace	39
	Modulovaný signál	39
	Časově invariantní modulátor	40
	Alternativní podoba kompozice modulačních funkcí	41
3.1.2	Dekompozice modulátoru na diskretní a expanzní část	41
	Diskretní a expanzní část	41
	Přesuny nelinearity modulace mezi diskretní a expanzní částí	42
	Přesuny paměti modulace mezi diskretní a expanzní částí	43
3.1.3	Mřížka modulátoru	45
3.1.4	Zobecnění definice pro vektorové datové symboly a multikanálovou modulaci	47
3.2	Základní vlastnosti digitálních modulací	48
3.2.1	Dimenze dat, dimenze modulace, kanálová dimenze modulace	48
3.2.2	Linearita	49
3.2.3	Nyquistova podmínka	50
3.2.4	Nyquistova podmínka ve frekvenční oblasti	53
	Odvození podmínky	53
	Konstrukce nyquistovských impulsů s omezenou šířkou pásma	54
3.2.5	Paměť modulace	55
3.2.6	Kódované modulace	55
	Kanálové kódování pro detekci a redukci chyb	55
	Blokové kódy	56
	Konvoluční kódy	56
3.2.7	Cyklostacionarita modulovaného signálu	57
3.2.8	Ortogonalita modulace	57
3.2.9	Energetické a výkonové charakteristiky	58
	Energie symbolu	58
	Výkon signálu	59

	Energie na bit	60
3.2.10	Vlastnosti obálky	60
	Modulace s konstantní obálkou	60
	Linkové kódy	61
3.2.11	Rozklad v signálovém prostoru, konstelace modulace	61
	Báze rozkladu	61
	Konstelace modulace	62
	Ortogonalita modulace	62
	Rotační invariance modulace	63
3.2.12	Minimální volná vzdálenost	63
3.3	Impulsy používané pro digitální modulace	64
3.3.1	Obdélníkový impuls	64
3.3.2	Impuls typu Raised Cosine	65
3.3.3	Impuls se spektrem typu Root Raised Cosine	65
3.4	Implementace digitálního modulátoru prostředky DSP	69
3.4.1	Vzorkování modulovaného signálu	69
3.4.2	Kauzalita a konečná délka modulačního impulsu	70
	Poznámky	73
4	Lineární digitální modulace	75
4.1	Lineární digitální modulace bez paměti	75
4.1.1	Společné vlastnosti	75
	Modulovaný signál	75
	Střední energie symbolu	76
	Rozklad v signálovém prostoru, konstelace modulace	76
	Minimální volná vzdálenost	77
	Vliv konstelace na střední energii symbolu a minimální volnou vzdálenost	78
4.1.2	PSK	78
	MPSK	78
	BPSK, 4PSK	79
	QPSK	79
4.1.3	ASK (PAM)	80
	OOK	81
	ASK	81
4.1.4	QASK (QAM)	83
4.1.5	APSK	83
4.1.6	Linkové kódy	85
	Unipolární modulace	85
	Polární modulace	85
	Manchester kód	85
4.2	Lineární digitální modulace s pamětí	85
4.2.1	Společné vlastnosti	85
	Modulovaný signál	85
	Střední energie symbolu	86

	Rozklad v signálovém prostoru, konstelace modulace	87
	Minimální volná vzdálenost	87
	88	88
4.2.2	Korelativní kódování	90
	Duobinární modulace	90
	Modifikovaná duobinární modulace	91
4.2.3	DPSK	92
4.2.4	$\pi/4$ DQPSK	95
4.2.5	TCM	96
4.2.6	TCM — Ungerboeckovy kódy	97
	Dělení množiny kanálových symbolů	97
	Ungerboeckova pravidla pro přiřazení kanálových symbolů na mřížku modulace	100
	Příklady Ungerboeckových kódů	103
4.2.7	Bipolární modulace	104
4.3	Multidimenzionální striktně lineární modulace bez paměti	104
4.3.1	Společné vlastnosti	104
	Modulovaný signál	105
	Střední energie symbolu	105
4.3.2	O-QPSK	106
4.3.3	OFDM	106
	Modulovaný signál ve spojitém čase	108
	Modulovaný signál v diskrétním čase	110
	Modulovaný signál v diskrétním čase — aproximace	113
	Poznámky	115
5	Nelineární digitální modulace	115
5.1	Nelineární digitální modulace bez paměti	115
5.1.1	FSK	118
5.2	Nelineární digitální modulace s pamětí	118
5.2.1	FSK s pamětí	122
5.2.2	Sunde FSK	123
5.2.3	CPFSK	123
	Základní podoba definice modulovaného signálu	124
	Alternativní podoba definice modulovaného signálu	128
	Vlastnosti modulace	129
5.2.4	MSK	129
5.2.5	CPM	129
	Alternativní podoba definice modulovaného signálu	131
	Základní podoba definice modulovaného signálu	134
	Laurentův rozvoj modulací třídy CPM	138
	Laurentův rozvoj modulace MSK	139
5.2.6	GMSK	141
5.2.7	TFM	143
5.2.8	GTFM	144
5.2.9	SFSK	144

5.2.10	MACPM	144
5.2.11	Millerův kód	146
III Spektrální vlastnosti digitálních modulací		149
6	Výkonové spektrum lineárních modulací	151
6.1	Obecný vztah pro spektrální výkonovou hustotu	151
6.1.1	Odvození obecného vztahu pro spektrální výkonovou hustotu	151
6.1.2	Spektrální výkonová hustota a její podoby ve speciálních případech	153
	Obecný vztah — sumarizace	153
	Modulace bez paměti v diskrétní části	153
	Striktně lineární modulace s paměti v diskrétní části	154
	Modulační impulsy REC1 a RRC	155
6.2	Spektrální výkonová hustota lineárních modulací	156
6.2.1	PSK, ASK, QAM, APSK	156
6.2.2	OOK	157
6.2.3	Unipolární modulace	157
6.2.4	Manchester kód	157
6.2.5	Korelativní kódování	158
	Duobinární modulace	158
	Modifikovaná duobinární modulace	159
6.2.6	DPSK, $\pi/4$ DQPSK	160
6.2.7	TCM Ungerboeckovy kódy	160
6.2.8	Bipolární modulace	161
7	Výkonové spektrum nelineárních modulací	165
7.1	Obecný vztah pro spektrální výkonovou hustotu	165
7.1.1	Odvození obecného vztahu pro spektrální výkonovou hustotu	165
7.1.2	Spektrální výkonová hustota a její podoby ve speciálních případech	172
	Obecný vztah — sumarizace	172
	Určení stacionárních pravděpodobností stavů	173
	Výpočet matice $\mathbf{Q}(f)$ — Fadějevova metoda	174
	Nelineární modulace bez paměti	175
	Modulace s neregulární poslopností stavů	176
7.2	Spektrální výkonová hustota nelineárních modulací	177
7.2.1	Millerův kód	177
7.2.2	Koherentní FSK s pamětí a s modulačním indexem $\kappa = 1$ (Sunde FSK)	180
7.2.3	CPFSK	183
	Odvození obecného vztahu	183
	Obecný vztah — shrnutí	186
	MSK	186
7.2.4	CPM	188
	Odvození obecného vztahu	188

	Obecný vztah — shrnutí	192
	SFSK, GMSK	192
8	Výkonové spektrum lineárních multidimenzionálních modulací	195
8.1	Obecný vztah pro spektrální výkonovou hustotu	195
8.1.1	Odvození obecného vztahu pro spektrální výkonovou hustotu	195
8.1.2	Spektrální výkonová hustota a její podoby ve speciálních případech	197
	Obecný vztah — sumarizace	197
	Modulace bez paměti v diskrétní části	197
8.2	Spektrální výkonová hustota lineárních multidimenzionálních modulací	197
8.2.1	O-QPSK	197
8.2.2	OFDM	198
IV	Komunikační kanál	201
9	Modely komunikačního kanálu	203
9.1	Obecné principy modelování komunikačního kanálu	203
9.1.1	Základní popis a klasifikace modelů komunikačních kanálů	203
	Operátor kanálu	203
	Závislost komunikačního kanálu na čase	203
	Frekvenční charakteristiky kanálu	204
	Stochastické chování kanálu	204
	Linearita kanálu	204
	Dimenzionalita kanálu	204
	Základní bloky modelů kanálu	205
9.1.2	Základní charakteristiky kanálu	205
	Vstupně-výstupní vztahy	205
	Charakteristiky parametrů kanálu	205
9.2	Komunikační kanál s AWGN	206
9.2.1	Vstupně-výstupní vztah a základní charakteristiky	206
9.2.2	Věrohodnostní funkce kanálu s AWGN	206
	Odvození věrohodnostní funkce	206
	Alternativní podoby věrohodnostní funkce	208
9.3	Lineární časově invariantní kanál	210
9.3.1	Frekvenčně neselektivní kanál	210
9.3.2	Frekvenčně selektivní kanál	210
9.4	Náhodný lineární časově proměnný kanál	210
9.4.1	Fyzikální model	211
	Paprskový model	211
	Ergodický kanál, stacionární model kanálu s nekorelovaným rozptylem	211
9.4.2	Vstupně-výstupní vztahy	213
	Časově proměnná impulsová odezva	213
	Časově proměnná přenosová funkce	213

	Dopplerovsky rozprostřená impulsová odezva	214
	Dopplerovsky rozprostřená přenosová funkce	214
9.4.3	Charakteristiky kanálu — distribuční funkce impulsové odezvy	215
	Rayleighovský kanál	216
	Riceovský kanál	216
9.4.4	Charakteristiky WSS-US rayleighovského kanálu — korelační funkce a výkonová spektra	217
	WSS-US kanál	217
9.4.5	Časově rozlišená zpožd'ovací korelační funkce	218
	Vztah čtyřdimenzionální a dvoudimenzionální charakteristiky	218
	Fyzikální interpretace	218
	Jednodimenzionální charakteristiky	219
	Skalární numerické hodnoty	219
	Měření	219
9.4.6	Časově a frekvenčně rozlišená korelační funkce	220
	Vztah čtyřdimenzionální a dvoudimenzionální charakteristiky	220
	Vztah k ostatním charakteristikám	220
	Jednodimenzionální charakteristiky	220
	Skalární numerické hodnoty	221
9.4.7	Dopplerovské frekvenčně rozlišené výkonové spektrum	221
	Vztah čtyřdimenzionální a dvoudimenzionální charakteristiky	221
	Vztah k ostatním charakteristikám	222
	Fyzikální interpretace	222
	Jednodimenzionální charakteristiky	222
	Skalární numerické hodnoty	223
	Měření	223
9.4.8	Dopplerovské zpožd'ovací výkonové spektrum (rozptylová funkce)	223
	Vztah čtyřdimenzionální a dvoudimenzionální charakteristiky	223
	Vztah k ostatním charakteristikám	224
9.4.9	Sumarizace charakteristik WSS-US rayleighovského kanálu	226
	Vztah čtyřdimenzionálních a dvoudimenzionálních charakteristik	226
	Vztahy mezi dvoudimenzionálními charakteristikami	226
	Jednodimenzionální a číselné charakteristiky charakteristiky	226
9.4.10	Klasifikace RLTV WSS-US kanálů	226
9.4.11	Dopplerovské výkonové spektrum pro uniformě distribuované rozptylovače	227
9.4.12	Transverzální model frekvenčně selektivního RLTV WSS-US kanálu	228
9.4.13	Multiplikativní model frekvenčně neselektivního RLTV WSS-US kanálu	231
9.5	Nelineární kanál	231
9.5.1	Nelineární kanál s obecnou AM/AM a AM/PM konverzí	231
9.5.2	Nelineární kanál s tvrdým limitérem	231
9.5.3	Volterrův model	232
9.6	Prostorově diverzitní komunikační kanál	232
9.7	Nejběžnější kompozitní modely komunikačních kanálů	233
9.7.1	Lineární AWGN kanál	233

9.7.2	Mobilní frekvenčně selektivní kanál	233
10	Digitální modulace v komunikačním kanálu	235
10.1	Lineární digitální modulace v lineárním komunikačním kanálu	235
10.1.1	Podoba modulace po průchodu lineárním kanálem	235
10.1.2	Mezisymbolová interference	236
10.2	Digitální modulace v lineárním komunikačním kanálu s mnohocestným šířením	237
10.2.1	Cyklický prefix	237
	Odvození	237
	Cyklický prefix pro OFDM	238
10.3	Digitální modulace v nelineárním komunikačním kanálu	239
10.3.1	Modulace s konstantní obálkou v nelineárním kanálu	239
V	Digitální demodulátor	241
11	Obecné principy detekce, synchronizace a ekvalizace	243
11.1	Obecný model komunikačního systému	243
11.1.1	Systémový model	243
11.1.2	Nezajímavé parametry kanálu	244
	Náhodnost parametru	244
	Parametr se známou apriorní hustotou pravděpodobnosti	245
	Speciální případ RPUP transformovatelný na RPKP	245
	Ergodicita parametru pro konečnou dobu pozorování	246
	Stopa parametru	246
11.2	Detekce dat	250
11.2.1	Kritérium optimality	250
	Pravděpodobnost chyby zprávy, symbolu a bitu	250
11.2.2	Detekce dat s minimální pravděpodobností chyby	252
	Detektor s minimální pravděpodobností chyby a s perfektní synchronizací	253
	Detektor s uniformně nejmenší pravděpodobností chyby	258
11.2.3	Detekce dat s minimální pravděpodobností chyby a doplňkovým kritériem	259
	Váňovaná chybovost, maximálně věrohodná MEP	259
	Detekce s nezávislou synchronizací a ekvalizací	260
11.3	Nezávislá synchronizace a ekvalizace — úvod do problematiky	260
	Poznámky	262
12	Optimální detekce dat s perfektní synchronizací pro lineární AWGN kanál	263
	Základní podoby detektorů	264
12.1	Detekce modulací bez paměti	265
12.1.1	Korelační detektor v časové doméně	265
	Optimální detekce symbol po symbolu	265
	Korelační detektor	267
	Přízpusobený filtr	267

	Mezisympolová interference	268
12.1.2	Detektor v signálovém prostoru minimalizující vzdálenost	269
	Báze rozkladu	269
	Průmět přijatého signálu	271
	Optimální detekce symbol po symbolu	272
12.1.3	Lineární modulace bez paměti	274
	Korelační detektor v časové oblasti	274
	Detektor v signálovém prostoru minimalizující vzdálenost	274
12.1.4	Detektory pro vybrané modulace bez paměti	276
	BPSK	276
	PSK	277
	QAM	277
	FSK bez paměti	278
12.2	Detekce modulací s pamětí	278
12.2.1	Optimální detekce posloupnosti dat	278
12.2.2	Viterbiho algoritmus	280
	Cílová funkce, metrika detektoru	280
	Definice úlohy hledání extrému	280
	Rekurentní metoda hledání extrému	280
	Shrnutí	283
	Viterbiho algoritmus s konečnou hloubkou paměti	283
12.2.3	Sekvenční algoritmy	284
12.2.4	Detektor pro modulace s pamětí	284
	Poznámky	286
13	Suboptimální metody detekce dat	287
	Základní oblasti aproximací a zjednodušení detektorů	287
13.1	Přímá detekce kanálových symbolů	288
13.2	Ignorování paměti modulace	288
13.2.1	Diferenční dekódování	288
	Diferenční dekódování DPSK	289
13.2.2	Detekce po blocích dat	290
13.3	Nelineární předzpracování signálu	291
13.3.1	Diskriminátorová detekce	291
13.4	Zjednodušení modelu kanálu	291
VI	Chybovost detekce digitálního demodulátoru	293
14	Chybovost detekce — základní pojmy a definice	295
14.1	Model systému a základní definice	295
	Modulovaný signál	295
	Detektor datové zprávy a detektor datových symbolů	295
	Pravděpodobnost chyby detekce	296

14.2	Pravděpodobnost chyby detektoru zprávy	296
14.2.1	Přechodové pravděpodobnosti diskrétního kanálu	296
14.2.2	Pravděpodobnost párové chyby	297
14.2.3	PME Union bound	298
14.2.4	Aproximace nejpravděpodobnější párovou chybou	298
14.3	Pravděpodobnost chyby detektoru symbolů	299
14.4	Vztahy mezi PME, PSE, PBE	300
14.4.1	Vztah mezi PME a PSE	300
14.4.2	Vztah mezi PSE a PBE	300
15	Pravděpodobnost chyby detekce v kanálu s AWGN	301
15.1	Pravděpodobnost chyby detektoru zprávy	301
15.1.1	Model systému	301
15.1.2	Pravděpodobnost párové chyby	302
15.1.3	Pravděpodobnost chyby zprávy	302
15.1.4	Lineární AWGN kanál	303
15.2	Pravděpodobnost chyby detektoru symbolů	304
15.2.1	Model systému	304
15.2.2	Pravděpodobnost párové chyby	304
15.2.3	Pravděpodobnost chyby symbolu	304
15.2.4	Lineární AWGN kanál	305
15.3	Pravděpodobnost chyby detekce v lineárním AWGN kanálu pro vybrané modulace	306
15.3.1	BPSK	306
15.3.2	QPSK	306
15.3.3	PSK	308
15.3.4	QAM	309
VII	Dodatky	311
A	Vybrané matematické vztahy	313
A.1	Gaussovské rozložení	313
A.1.1	Hustota pravděpodobnosti	313
A.1.2	Komplementární distribuční funkce Q	313
A.2	Besselovy funkce	313
A.3	Řady	314
A.4	Fourierova transformace	314
B	Symbody a zkratky	315
B.1	Seznam matematických symbolů	315
B.2	Seznam zkratek	319
	Literatura	323
	Index	325