

Obsah.

1 ÚVOD	1
2 SIGNÁLY A SYSTÉMY V TEORII DIGITÁLNÍ KOMUNIKACE	4
- 2.1 POPIS SIGNÁLŮ A JEJICH VLASTNOSTÍ	4
2.1.1 Charakteristiky signálů v časové oblasti	7
2.1.2 Charakteristiky signálů na množině realizací	9
2.1.3 Vztah mezi pravděpodobnostními a empirickými charakteristikami signálů—Průměrné charakteristiky	12
2.2 POUŽITÍ KOMPLEXNÍ OBÁLKY PŘI ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ	16
2.2.1 Signál na nosném kmitočtu s omezenou šířkou pásma, úzkopásmový signál, signál v základním pásmu	17
2.2.2 Komplexní obálka signálu	18
- Komplexní obálka WSS signálu	18
- Komplexní obálka nestacionárního signálu	23
- Komplexní obálka signálu s omezenou šířkou pásma	24
Šířka pásma komplexní obálky	27
2.2.3 Vztah reálného signálu a jeho charakteristik ke komplexní obálce a jejím charakteristikám	27
- Získání reálného signálu z jeho komplexní obálky	27
- Charakteristiky výkonových signálů	28
Shrnutí pro výkonové signály	30
Diskuse podmínek pro výkonové signály	30
- Charakteristiky energetických signálů	31
2.2.4 Průchod signálu lineárním obvodem	32
2.2.5 Model komplexní obálky bílého gaussovského šumu při zpracování obvodu s omezenou šířkou pásma	34
2.2.6 Komplexní obálka a signály v základním pásmu	36
- 2.3 REPREZENTACE SIGNÁLŮ ROZKLADEM V ORTONORMÁLNÍM SYSTÉMU—SIGNÁLOVÝ PROSTOR	37
- 2.3.1 Hilbertův prostor	37
- Prostor L_2	38
- Euklidovský prostor E_N	38
- 2.3.2 Ortonormální rozklad signálů—signálový prostor	39
- 2.3.3 Charakteristiky signálů v signálovém prostoru	40
- Důsledky pro reprezentaci komplexní obálky signálu v signálovém prostoru	41
- 2.3.4 Klasifikace signálů podle jejich vzájemných vztahů	41
- Binární antipodální (opačné) signály	41
- Ortogonální signály	42
- Biortogonální signály	43
- Simplexní signály	44
- 2.3.5 Karhunenův-Loévuův rozklad náhodného procesu	45
- Fredholmova integrální rovnice s pozitivně semidefinitním jádrem	46
- Mercerova věta	47
- Pozitivní semidefinitnost a symetrie autokorelační funkce náhodného procesu s konečnou energií	47
- Karhunenova-Loévuova věta	48
- Rozklad stacionárních periodických procesů	50
- Rozklad stacionárního procesu na nekonečném intervalu	51
- Rozklad signálů s nekonečnou energií	51
- Rozklad gaussovského procesu s konečnou energií	52
- Rozklad komplexní obálky bílého gaussovského šumu	52

3 DIGITÁLNÍ MODULACE	53
3.1 DEFINICE DIGITÁLNÍ MODULACE	53
3.1.1 Zápis digitálně modulovaného signálu	53
Poznámka k době trvání modulační funkce	56
Historická poznámka	56
3.1.2 Klasifikace digitálních modulací podle způsobu generování modulovaného signálu	56
Poznámka k pojmu modulace s plnou a částečnou odezvou	58
3.1.3 Klasifikace modulací podle typu použitých signálů	59
Modulační funkce, modulační signál	59
Modulovaný signál	59
3.1.4 Impulsy používané při definici digitálních modulací	59
Pravoúhlý impuls	60
Impuls typu Raised Cosine	60
Impuls se spektrem typu Raised Cosine	61
Impuls se spektrem typu Square Root Raised Cosine	62
3.2 LINEÁRNÍ DIGITÁLNÍ MODULACE BEZ PAMĚTI	63
Energie na jeden symbol, energie na jeden bit informace	63
Rozklad v ortonormální bázi	64
3.2.1 Binární fázové klíčování (BPSK)	64
3.2.2 M-fázové klíčování (M-PSK)	65
3.2.3 QuadriPhase Shift Keying (QPSK)	66
3.2.4 On-Off Keying (OOK)	67
3.2.5 Amplitudové klíčování (M-ASK)	67
3.2.6 Quadrature M-ASK (Q-M-ASK)	68
3.2.7 Unipolární modulace	70
3.2.8 Polární modulace	70
3.2.9 Manchester kód	70
3.3 NELINEÁRNÍ DIGITÁLNÍ MODULACE BEZ PAMĚTI	71
3.3.1 Frekvenční klíčování (M-FSK)	71
3.3.2 Offset-QPSK (O-QPSK)	73
3.4 LINEÁRNÍ DIGITÁLNÍ MODULACE S PAMĚTÍ	75
Rozklad v ortonormální bázi	75
Energie na jeden symbol, energie na jeden bit informace	75
3.4.1 Korelativní kódování	76
3.4.2 Duobinární modulace	78
3.4.3 Modifikovaná duobinární modulace	79
3.4.4 Diferenční PSK (DPSK)	79
3.4.5 Diferenční $\pi/4$ QPSK ($\pi/4$ DQPSK)	81
3.4.6 Bipolární modulace	82
3.4.7 Linear Trellis Coded Modulation (Linear TCM)	83
3.4.8 Ungerboeckovy kódy	84
Trellis coded 8-PSK	89
Trellis Coded 16-Q-M-ASK	90
3.4.9 Lineární TCM s nelineárním kódováním	91
3.5 NELINEÁRNÍ DIGITÁLNÍ MODULACE S PAMĚTÍ	92
3.5.1 Frekvenční klíčování (M-FSK)	92
3.5.2 Sunde's BFSK	95
3.5.3 Continuous Phase FSK (CPFSK)	96
3.5.4 Minimum Shift Keying (MSK)	100
3.5.5 Continuous Phase Modulation (CPM)	105
3.5.6 Gaussian MSK (GMSK)	108
3.5.7 Tamed FM (TFM)	110
3.5.8 Sinusoidal FSK (SFSK)	111
3.5.9 Multiampitude CPM (MACPM)	112
3.5.10 Millerův kód (Delay modulation)	114

4	SPEKTRÁLNÍ VLASTNOSTI DIGITÁLNÍCH MODULACÍ.....	116
4.1	VÝKONOVÉ SPEKTRUM LINEÁRNÍCH MODULACÍ	116
4.1.1	M-PSK.....	118
4.1.2	On-Off Keying (OOK)	119
4.1.3	M-ASK.....	120
4.1.4	Q-M-ASK.....	120
4.1.5	Unipolární modulace.....	121
4.1.6	Polární modulace.....	122
4.1.7	Manchester kód.....	122
4.1.8	Korelativní kódování	123
4.1.9	Duobinární modulace.....	124
4.1.10	Modifikovaná duobinární modulace	125
4.1.11	Bipolární modulace.....	126
4.2	VÝKONOVÉ SPEKTRUM NELINEÁRNÍCH MODULACÍ.....	128
4.2.1	Millerův kód	134
4.2.2	Binární ortogonální koherentní FSK s pamětí a $\Delta f = 1/(2T_S)$	137
4.2.3	Sunde's BFSK	141
4.2.4	Offset-QPSK.....	143
4.2.5	MSK (alternativní-bez paměti)	144
4.2.6	CPFSK	146
4.2.7	MSK	149
4.2.8	CPM	149
5	LINEÁRNÍ DIGITÁLNÍ MODULACE V KANÁLU S OMEZENOU ŠÍRKOU PÁSMU.....	154
5.1	PRŮCHOD LINEÁRNĚ DIGITÁLNĚ MODULOVANÝCH SIGNÁLŮ LINEÁRNÍM KANÁLEM.....	154
5.2	MEZISYMBOLOVÁ INTERFERENCE	155
5.2.1	Konstrukce modulačních impulsů s $ISI=0$ pro kanál s omezenou šířkou pásma ...	158
-	Ideální řešení	159
-	Praktické řešení	160
6	FÁZOVÝ ZÁVĚS—PLL	162
6.1	FÁZOVÝ ZÁVĚS - ZÁKLADNÍ POZNATKY	162
6.1.1	Ekvivalentní model fázového závěsu	163
-	PLL 1. řádu.....	167
-	PLL 2. řádu 1. typu	167
-	PLL 2. řádu 2. typu	168
-	PLL 3. a vyšších řádů.....	170
6.1.2	Odvození ekvivalentního modelu fázového závěsu pro vybrané konkrétní implementace	170
-	PLL se součinným detektorem fáze (MPD-PLL).....	170
-	PLL pro komplexní obálky se součinným detektorem fáze (CE-MPD-PLL).....	176
-	PLL - jednoduchá syntéza kmitočtu	178
6.1.3	Fázové detektory	183
-	Obecný postup odvození ekvivalentní charakteristiky detektoru.....	183
-	Součinný detektor fáze pro signály na nosném kmitočtu (MPD).....	186
-	Součinný detektor fáze s limitérem v signálové cestě (HLS-MPD).....	186
-	Detektor fáze XOR (XOR-PD)	190
-	Detektor fáze s klopným obvodem RS (RS-PD).....	192
6.1.4	Stavový popis fázového závěsu.....	196
-	PLL 1. řádu.....	197
-	PLL 2. řádu.....	197

6.2 LINEARIZACE FÁZOVÉHO ZÁVĚSU, VLASTNOSTI POPSATELNÉ LINEÁRNÍM MODELEM ..	199
6.2.1 Linearizovaný ekvivalentní model, přenosová funkce, šumová šířka pásma	200
PLL 1. řádu.....	202
PLL 2. řádu.....	203
6.2.2 Přejchodová odezva linearizovaného PLL	205
Ustálený stav	205
Fázový skok	206
Frekvenční skok	207
Frekvenční rampa	209
6.2.3 Stabilita.....	210
6.2.4 Vlastnosti linearizovaného PLL za přítomnosti šumu	211
6.2.5 Optimalizace v rámci lineárního modelu	213
6.3 NELINEÁRNÍ JEVI VE SMYČCE FÁZOVÉHO ZÁVĚSU.....	218
6.3.1 Matematický popis nelineárního modelu se stochastickým buzením	218
Odvození Fokkerovy-Planckovy rovnice	220
Odvození koeficientů intenzity	223
Koeficienty intenzity pro PLL 1. řádu.....	226
Koeficienty intenzity pro PLL 1. řádu s náhodnou fázovou modulací vstupního signálu typu $1/f^2$	227
Koeficienty intenzity pro PLL 2. řádu 2. typu s náhodnou fázovou modulací vstupního signálu typu $1/f^2$	228
6.3.2 Stacionární hustota pravděpodobnosti chyby fáze.....	229
PLL 1. řádu.....	231
PLL 2. řádu 2. typu	236
6.3.3 Výpadky synchronizace	240
Regenerativní proces (Renewal Process)	242
Střední doba mezi výpadky synchronizace	243
Střední doba mezi výpadky synchronizace PLL 1. řádu	246
Střední doba mezi výpadky synchronizace PLL 2. řádu	249
Distribuční funkce doby mezi výpadky synchronizace.....	250
Rozsah udržení synchronizace (Hold-in Range)	251
Rozsah udržení synchronizace (Hold-in Range) PLL 1. řádu	251
Rozsah udržení synchronizace (Hold-in Range) PLL 2. řádu 2. typu	252
Rozsah udržení synchronizace (Hold-in Range) PLL 2. řádu 1. typu	252
6.3.4 Pasivní synchronizace PLL (Unaided Acquisition)	252
Zasynchronizování fáze v PLL	253
Zasynchronizování frekvence v PLL	255
Doba zasynchronizování	255
Rozsah zachycení (Pull-in Range)	255
PLL 1. řádu.....	256
PLL 2. řádu 2. typu	259
6.3.5 Aktivní synchronizace PLL (Aided Acquisition)	263
Aktivní synchronizace fáze	264
Aktivní synchronizace frekvence	265

7 APLIKACE TEORIE ODHADU PARAMETRŮ NA DIGITÁLNÍ KOMUNIKACI 269

7.1 DEFINICE ÚLOHY OPTIMÁLNÍ DETEKCE DAT V DIGITÁLNÍ KOMUNIKACI.....	269
7.2 KRITÉRIUM OPTIMÁLNÍ DETEKCE DAT	270
7.2.1 Optimální detekce s eliminací nezajímavých náhodných parametrů signálu.....	271
7.2.2 Detekce dat s nezávislými odhady nenáhodných parametrů	275
7.2.3 Nezávislé odhady nenáhodných parametrů s podporou odhadů dat.....	276
7.2.4 Spojený odhad nezajímavých náhodných parametrů signálu	277
7.2.5 Diskuse.....	279
7.3 MATEMATICKÉ MODELY KANÁLU, TYPY DETEKCE	280
Typy detekce	280
Věrohodnostní funkce	280
Eliminace nezajímavých náhodných parametrů signálu z věrohodnostní funkce.....	281
7.3.1 Kanál s AWGN, věrohodnostní funkce.....	281

× - 7.3.2 Kanál s náhodnou fází a AWGN, věrohodnostní funkce	284
- 8 KOHERENTNÍ DETEKCE DAT PRO LINEÁRNÍ KANÁL S AWGN ..	287
- Model kanálu.....	288
- 8.1 KOHERENTNÍ DETEKCE MODULACE S PLNOU ODEZVOU A BEZ PAMĚTI	288
- 8.1.1 Optimální detekce symbol po symbolu	288
- 8.1.2 Korelační detektor	290
- 8.1.3 Přizpůsobený filtr	291
- 8.1.4 Detektor s rozkladem signálu v signálovém prostoru	292
- 8.1.5 Lineární modulace s plnou odezvou a bez paměti	296
- 8.1.6 Koherentní detektory pro vybrané modulace s plnou odezvou a bez paměti	298
- BPSK	298
- MPSK	299
- On-Off Keying	300
- 8.2 KOHERENTNÍ DETEKCE MODULACE S PLNOU ODEZVOU A S PAMĚTÍ	300
- 8.2.1 Optimální detekce posloupnosti dat	300
- Viterbiho algoritmus	302
- Sekvenční algoritmy	305
- Koherentní detektor pro modulace s pamětí	305
- 8.2.2 Suboptimální metody detekce	306
- Diferenční detekce (detekce s diferenčním dekódováním)	307
- Detekce po blocích dat	308
9 SYNCHRONIZACE.....	309
- 9.1 OBECNÝ PŘÍSTUP K NÁVRHU SYNCHRONIZÁTORŮ	309
- Optimální a suboptimální synchronizátory	309
- Druhy synchronizátorů, model kanálu	310
- Synchronizace s pilotním signálem	311
- Topologické uspořádání synchronizátoru	311
- 9.2 SYNCHRONIZACE NOSNÉ.....	312
- Nejednoznačnost synchronizace fáze	313
- 9.2.1 BPSK Synchronizátor s nelinearitou typu $(.)^2$	313
- 9.2.2 BPSK Costasova smyčka	322
- 9.2.3 ML odhad fáze pro MPSK s eliminací dat	324
- BPSK	326
- QPSK	329
- 9.2.4 ML odhad fáze pro MPSK s podporou odhadů dat	332
- 9.3 SYNCHRONIZACE SYMBOLŮ.....	335
- 9.3.1 ML synchronizátor symbolů s eliminací dat pro BPSK	335
- 9.3.2 Synchronizátor s nelinearitou pro lineární modulace	336
- 9.4 SYNCHRONIZACE RÁMCE DAT	338
10 DODATEK—DEFINICE A VYBRANÉ MATEMATICKÉ VZTAHY... 339	
10.1 POUŽITÉ ZNAČKY A DEFINICE.....	339
10.2 ŘADY	340
10.3 VZTAHY Z INTEGRÁLNÍHO A DIFERENCIÁLNÍHO POČTU	340
10.4 VYBRANÉ VZTAHY PRO TRIGONOMETRICKÉ A HYPERBOLICKÉ FUNKCE	341
10.5 FOURIEROVA TRANSFORMACE.....	342
10.6 HILBERTOVA TRANSFORMACE	343
10.7 BESSELOVY FUNKCE	343
10.8 CHYBOVÁ FUNKCE.....	343
10.9 GAUSSOVSKÉ (NORMÁLNÍ) ROZLOŽENÍ.....	344

10.10 OBÁLKA A FÁZE HARMONICKÉHO SIGNÁLU S ADITIVNÍM ÚZKOPÁSMOVÝM GAUSSOVSKÝM ŠUMEM	345
--	------------

SEZNAM LITERATURY	346
--------------------------------	------------