

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Übertragungskanal</b>	<b>5</b>
2.1. Kanaldefinitionen . . . . .	5
2.2. AWGN-Kanal . . . . .	7
2.3. Mobilfunkkanal . . . . .	9
2.3.1. Allgemeines . . . . .	9
2.3.2. Mehrwegeausbreitung . . . . .	10
2.3.3. Doppler-Effekt . . . . .	12
2.3.4. Rayleigh-Kanal mit klassischem Dopplerspektrum . . . . .	17
2.3.5. Verallgemeinerung des Rayleigh-Kanal-Modells . . . . .	29
2.3.6. Rice-Kanal . . . . .	31
2.3.7. Modellierung des Mobilfunkkanals als FIR-Filter . . . . .	34
2.3.8. Bello-Funktionen . . . . .	39
2.3.9. Korrelationsfunktionen einfacher WSSUS-Kanäle . . . . .	59
<b>3. Modulation und Signalspreizung</b>	<b>75</b>
3.1. Modulation . . . . .	77
3.2. Spreizverfahren . . . . .	85
3.2.1. Allgemeines . . . . .	85
3.2.2. DS-Spreizung . . . . .	87
3.2.3. MC-Spreizung . . . . .	92
3.2.4. FH-Spreizung . . . . .	96
3.2.5. TH-Spreizung . . . . .	100
<b>4. Vielfachzugriffsverfahren</b>	<b>103</b>
4.1. SDMA . . . . .	104
4.1.1. Raummultiplex . . . . .	105
4.1.2. Massive MIMO . . . . .	107
4.2. FDMA . . . . .	110
4.3. TDMA . . . . .	114
4.4. OFDMA . . . . .	119
4.4.1. WiMAX . . . . .	120
4.4.2. LTE . . . . .	124
4.5. CDMA . . . . .	130
<b>5. Vermeidung ISI-bedingter Fehler</b>	<b>141</b>
5.1. Schmalbandübertragung . . . . .	142

5.2.	Entzerrung im Zeitbereich . . . . .	142
5.2.1.	Zero-Forcing . . . . .	143
5.2.2.	MMSE-Entzerrer . . . . .	146
5.2.3.	Decision-Feedback Entzerrer . . . . .	148
5.2.4.	Tomlinson-Harashima-Vorcodierung . . . . .	150
5.3.	Entzerrung im Frequenzbereich . . . . .	154
5.4.	Entzerrung im Doppler-Verzögerungsbereich . . . . .	159
5.5.	MLSE-Empfang . . . . .	165
5.5.1.	Euklidische Distanzmetrik . . . . .	165
5.5.2.	Ungerboeck-Empfänger . . . . .	168
5.5.3.	Forney-Empfänger . . . . .	179
5.6.	Rake-Empfänger . . . . .	186
5.7.	Beamforming . . . . .	187
<b>6.</b>	<b>Diversitätsverfahren</b>	<b>189</b>
6.1.	Raumdiversität . . . . .	190
6.1.1.	Empfangsdiversität . . . . .	192
6.1.2.	Sendediversität bei Kanalkenntnis . . . . .	197
6.1.3.	Sendediversität ohne Kanalkenntnis . . . . .	201
6.1.4.	Equal Gain Adding . . . . .	210
6.1.5.	Raumdiversität in MIMO-Systemen . . . . .	212
6.1.6.	Antennenabstand für Raumdiversität . . . . .	215
6.2.	Polarisationsdiversität . . . . .	218
6.3.	Zeit- und Frequenzdiversität . . . . .	219
6.3.1.	Allgemeines . . . . .	219
6.3.2.	OFDM . . . . .	220
6.3.3.	Cyclic Delay Diversity . . . . .	221
6.3.4.	OTFS . . . . .	225
6.4.	Pfaddiversität . . . . .	226
<b>7.</b>	<b>LTE-Übertragungsmodi im Downlink</b>	<b>227</b>
<b>8.</b>	<b>Kanalschätzung</b>	<b>237</b>
8.1.	Einzelträgermodulation . . . . .	237
8.1.1.	Kanalschätzung mit Trainingssequence . . . . .	237
8.1.2.	Kanalschätzung mit Pilotsignal . . . . .	243
8.2.	OFDM . . . . .	246
8.2.1.	Kanalschätzung mit Trainingssequenz . . . . .	246
8.2.2.	Kanalschätzung mit Pilotsignalen . . . . .	249
<b>A.</b>	<b>Übertragungskanal</b>	<b>255</b>
A.1.	Transformation von Wahrscheinlichkeitsdichten . . . . .	255
A.2.	Simulation des Rayleigh-Störprozesses . . . . .	256

Inhaltsverzeichnis	XI
A.3. PSD eines differenzierten Signals . . . . .	259
A.4. Leistungsspektrum Rayleigh-Störprozess . . . . .	261
A.5. Bello-Funktionen . . . . .	264
A.6. Kontinuierliche und diskrete Bello-Funktionen . . . . .	266
<b>B. Signalspreizung</b>	<b>269</b>
B.1. Bitfehlerwahrscheinlichkeit in einem DS-SSS . . . . .	269
B.2. Bitfehlerwahrscheinlichkeit in einem FH-SSS . . . . .	275
<b>C. Vielfachzugriff</b>	<b>277</b>
C.1. Singulärwert-Zerlegung . . . . .	277
C.2. Datendurchsatz im ALOHA-Netz . . . . .	278
<b>D. Entzerrung</b>	<b>281</b>
D.1. Tomlinson-Harashima-Vorcodierung . . . . .	281
D.2. AKF und Energiedichtespektrum der Kanalimpulsantwort . . . . .	281
D.3. Impulsantwort des OTFS-Systems . . . . .	283
D.4. 2D-LSE-Entzerrung für OFTS . . . . .	285
D.5. Strahlformung mit einem ULA . . . . .	289
<b>E. Diversität</b>	<b>293</b>
E.1. Vektordarstellung von Signalen . . . . .	293
E.2. Empfangsdiversität . . . . .	294
E.2.1. Selection Diversity Combining . . . . .	294
E.2.2. Maximum Ratio Combining . . . . .	296
E.2.3. Equal Gain Combining . . . . .	299
E.2.4. Wahrscheinlichkeitsdichte des SNR bei STTD . . . . .	299
E.3. Korrelation zwischen Antennen . . . . .	300
E.4. Virtuelle Pilotsignale . . . . .	301
<b>Abkürzungen</b>	<b>305</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>311</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>315</b>
<b>Index</b>	<b>321</b>