Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
1.1 *Software Defined Radio*-Systeme 1
1.1.1 Verarbeitung im Digitalteil 2
1.1.2 Hardware und Software im Digitalteil 3
1.1.3 Telemetrie-Systeme 3
1.1.4 SDR-Systeme für Entwicklung und Test 4
1.2 *Matlab* und *Octave* 5
1.3 Kapitelübersicht 6
1.4 Vorkenntnisse 7
1.5 Notation 8

2 Darstellung von Signalen und Spektren 11
2.1 Kontinuierliche und diskrete Signale 11
2.2 Spektrum eines Signals 14
2.2.1 Praktische Berechnung des Spektrums 14
2.2.2 Hintergründe zur Berechnung des Spektrums 19
2.2.3 Beispiel 23
2.3 Unterabtastung und Überabtastung 27
2.3.1 Einfache Berechnung von Tiefpass-Filtern 29
2.3.2 Filter-Berechnungsfunktion 32
2.4 Berechnung allgemeiner Tiefpass-Filter 32
2.5 Zusammenfassung 33

3 Aufbau und Signale eines *Software Defined Radio*-Systems 35
3.1 Blockschaltbilder eines *SDR*-Systems 37
3.2 Basisbandsignale und Trägersignale 38
3.2.1 Amplituden- und Frequenzmodulation 39
3.2.2 I/Q-Modulation 40
3.2.3 Spektren des Basisbandsignals und des Trägersignals 43
3.2.4 I/Q-Demodulation 44

3.2.5 Beispiel zur I/Q-Modulation und I/Q-Demodulation 46
3.3 Empfänger-Topologien 53
3.3.1 Direct Conversion Receiver 54
3.3.2 RF Sampling Receiver 57
3.3.3 Beispiel für einen RF Sampling Receiver 59
3.3.4 Überlagerungsempfänger 60
3.3.5 Hintergründe zur Frequenzumsetzung mit einem Mischer 63
3.3.6 Beispiel für einen Multiband-Amateurfunk-Empfänger 67
3.3.7 Beispiel für einen Miniatur-Empfänger 68
3.4 Signale in einem *SDR*-System 69
3.4.1 Übertragungsarten 69
3.4.2 Paket-Übertragung 70
3.4.3 CRC-Codierung 71
3.4.4 Scrambler 75
3.4.5 Symbol-Mapper 78
3.4.6 Präambel 82
3.4.7 Modulator 90
3.4.8 Nyquist Filter und Root Nyquist Filter 94
3.4.9 I/Q-Modulation und D/A-Umsetzung 99
3.4.10 Analoger Sender 103
3.4.11 GFSK: Eine einfache Alternative 103
3.4.12 Sequenz-Spreizung 112
3.4.13 Nachrichtentechnischer Kanal 124

4 Drahtlose Netzwerke 135
4.1 Wireless Personal Area Networks 137
4.2 Sensornetzerke 139

5 Übertragungsstrecke 143
5.1 Funkstrecke 145
5.1.1 Freiraumdämpfung 146
5.1.2 Dämpfungsexponent 147
5.1.3 Antennengewinn 148
5.1.4 Äquivalente Sendeleistung 149
5.2 Antennen 150
5.2.1 Beschreibung mit Kugelkoordinaten 151
5.2.2 Richtcharakteristik 153
5.2.3 Strahlungsleistungsdichte 154
5.2.4 Antennenwirkfläche 155
5.2.5 Größen einer Funkübertragungsstrecke 157
5.2.6 Vektoren des elektromagnetischen Feldes 158
5.2.7 Polarisation 158
5.2.8 Berechnung von Antennen 162

5.2.9 Anpassung . . . 174
5.2.10 Beispiele . . . 179

6 Leistungsdaten eines Empfängers . . . 189
6.1 Rauschen . . . 191
6.1.1 Ursachen und Rauschleistungsdichten . . . 191
6.1.2 Thermische Rauschleistungsdichte . . . 192
6.1.3 Thermisches Rauschen als diskretes Signal . . . 193
6.1.4 Rauschzahl . . . 193
6.1.5 Alternative Definition der Rauschzahl . . . 194
6.1.6 Kettenrauschzahl . . . 195
6.1.7 Verstärkungen und Rauschzahlen typischer Komponenten . . . 197
6.1.8 Beispiel . . . 199
6.2 Nichtlinearität . . . 202
6.2.1 Nichtlineare Kennlinien . . . 202
6.2.2 Intermodulation . . . 205
6.2.3 Intermodulationsabstände und Interceptpunkte . . . 208
6.2.4 Ketten-Interceptpunkte . . . 210
6.2.5 Beispiel . . . 213
6.3 Abhängigkeit von der Verstärkungseinstellung . . . 215
6.4 Dynamikbereich eines Empfängers . . . 216
6.4.1 Minimaler Empfangspegel . . . 216
6.4.2 Maximaler Empfangspegel . . . 218
6.4.3 Dynamikbereich . . . 218
6.4.4 Inband-Dynamikbereich . . . 219
6.4.5 Spurious Free Dynamic Range . . . 221

7 Digital Downconverter . . . 223
7.1 CIC-Filter . . . 227
7.1.1 Übertragungsfunktion . . . 227
7.1.2 Bandbreite und Alias-Dämpfung . . . 227
7.1.3 Wortbreiten der Signale . . . 230
7.1.4 Kompensationsfilter . . . 233
7.2 Polyphasen-FIR-Filter . . . 235
7.2.1 Funktionsprinzip . . . 235
7.2.2 Polyphasen-Zerlegung . . . 235
7.2.3 Praktische Realisierung . . . 237
7.2.4 Relative Bandbreite und Berechnung der Koeffizienten . . . 240
7.3 Halbband-Filterkaskade . . . 244
7.3.1 Aufbau einer Halbband-Filterkaskade . . . 244
7.3.2 Entwurf eines Halbbandfilters . . . 245
7.4 Interpolation . . . 252
7.4.1 Interpolation zur Symbolabtastung . . . 255

7.4.2 Konstante Signalverzögerung mit einem FIR-Filter 255
7.4.3 Variable Signalverzögerung mit einem FIR-Filter 263
7.5 Beispiel 272

8 Demodulation digital modulierter Signale 277
8.1 Einführung 278
8.1.1 Aufgabe eines Demodulators 278
8.1.2 Betrachtete Übertragungssysteme 278
8.1.3 Kanal 279
8.1.4 Paket-Übertragung 280
8.1.5 Vorverarbeitung 281
8.2 Demodulation einer GFSK-Paketsendung 282
8.2.1 LDI-Demodulator 282
8.2.2 Signalparameter 284
8.2.3 Signal-Rausch-Abstand 284
8.2.4 Signale im Sender und im Empfänger 286
8.2.5 Detektion 289
8.2.6 Detektionsschwelle und Detektionsfehler 292
8.2.7 Wahrscheinlichkeiten für Detektionsfehler 294
8.2.8 Detektor mit euklidischer Metrik 301
8.2.9 Symbol-Abtastung 308
8.3 Demodulation einer PAM-Paketsendung 317
8.3.1 Differenzielle Übertragung der Symbole 318
8.3.2 Differenzielle Übertragung auf der Signal-Ebene 321
8.4 Signalpegel 323
8.4.1 Präambel-Detektion 324
8.4.2 Symbol-Abtastung 332
8.5 Zusammenfassung 338

Anhang A: Eine kurze Einführung in *Matlab/Octave* 341
A.1 Vektoren 342
A.1.1 Zeilen- und Spaltenvektoren 342
A.1.2 Komplex-wertige Vektoren 343
A.1.3 Umwandlungen 343
A.1.4 Multiplikation 344
A.1.5 Wiederholungen 345
A.1.6 Multiplexer und Demultiplexer 345
A.2 Funktionen zur Signalverarbeitung 346
A.2.1 Faltung 346
A.2.2 Korrelation 350
A.2.3 Komplexe Mischung 350
A.3 Spezielle Funktionen zur Echtzeitverarbeitung 351
A.3.1 Funksignalempfang mit einem RTL-SDR-Empfänger 351

A.3.2 Audioausgabe . . . 354
A.3.3 Beispiel . . . 355

Anhang B: Ergänzungen . . . 359
B.1 Rauschbandbreite eines Tiefpass-Filters . . . 359
B.2 Fensterfunktionen . . . 361

Anhang C: Verzeichnis der *Matlab*/*Octave*-Funktionen . . . 365
C.1 `sig` – Signale und Spektren . . . 366
C.2 `sdr` – Aufbau und Signale eines SDR-Systems . . . 367
C.3 `ueb` – Übertragungsstrecke . . . 369
C.4 `daten` – Leistungsdaten eines Empfängers . . . 370
C.5 `ddc` – Digital Downconverter . . . 371
C.6 `demod` – Demodulation . . . 372

Literatur . . . 375

Sachverzeichnis . . . 377

http://www.springer.com/978-3-662-53233-1

Software Defined Radio-Systeme für die Telemetrie
Aufbau und Funktionsweise von der Antenne bis zum Bit-Ausgang

Heuberger, A.; Gamm, E.

2017, XIII, 383 S. 288 Abb., Hardcover
ISBN: 978-3-662-53233-1