
Software Defined Radio-Systeme für die Telemetrie

Albert Heuberger · Eberhard Gamm

Software Defined Radio-Systeme für die Telemetrie

Aufbau und Funktionsweise von der
Antenne bis zum Bit-Ausgang

Albert Heuberger
Fraunhofer-Institut für Integrierte
Schaltungen IIS
Erlangen
Deutschland

Eberhard Gamm
Ebermannstadt
Bayern
Deutschland

Die Darstellung von manchen Formeln und Strukturelementen war in einigen elektronischen Ausgaben nicht korrekt, dies ist nun korrigiert. Wir bitten damit verbundene Unannehmlichkeiten zu entschuldigen und danken den Lesern für Hinweise.

ISBN 978-3-662-53233-1 ISBN 978-3-662-53234-8 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-53234-8

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Software Defined Radios (SDR) gewinnen zunehmend an Bedeutung, vor allem in Bereichen, in denen der Einsatz von speziellen Hardware-Lösungen aus Kostengründen nicht möglich ist. Zu diesen Bereichen gehört auch die *Funktelemetrie*, auf die das vorliegende Buch in erster Linie abhebt. Aufgabe von Telemetrie-Systemen ist das Einsammeln von Sensordaten, z. B. von Strom-, Gas- und Wasserzählern oder *Umweltsensoren* für Wind, Regen und Emissionen. Diese mehr oder weniger intelligenten Sensoren werden auch als *Smart Sensors* bezeichnet. In diesem Bereich werden in den Sensoren häufig spezielle Hardware-Lösungen eingesetzt – das ist aufgrund der hohen Stückzahlen *möglich* und aufgrund der Stromversorgung mit Knopfzellen auch *nötig* –, während die zugehörigen Basisstationen als *Software Defined Radios* ausgeführt werden. Dies führt zu Verhältnissen, wie sie aus der Mobilkommunikation bekannt sind. Allerdings sind die Datenübertragungsraten in der Regel etwa um den Faktor 1000 geringer.

Während sich im Bereich der Mobilkommunikation und im Bereich des stationären, drahtlosen Internetzugangs mit GSM, UMTS/LTE und IEEE 802.11 (WLAN) bereits internationale Standards durchgesetzt haben, wird eine entsprechende Standardisierung von Funktelemetrie-Systemen zur Zeit (2016) gerade in Angriff genommen. Mobilkommunikations- und die WLAN-Anbieter versuchen, diesen Bereich zu besetzen.

Wie in der Mobilkommunikation kommt den Basisstationen auch in Telemetrie-Systemen eine zentrale Rolle zu, die eine Ausführung als *Software Defined Radio* nahelegt. Es ist nämlich zu erwarten, dass sich mehrere Standards entwickeln und anschließend auch weiterentwickeln werden, so dass die Basisstationen mehrere, zum Zeitpunkt ihrer Installation eventuell noch nicht bekannte Funkübertragungsprotokolle beherrschen sollten. Dies lässt sich unter der Voraussetzung, dass eine entsprechende Rechenleistung vorhanden ist, als *Software Update* realisieren. Im Falle einer erforderlichen Erhöhung der Rechenleistung könnten Basisstationen mit austauschbarem Prozessor-Modul eine kostengünstigere Lösung bieten als der Komplett-Tausch. Hier bleibt die technische Entwicklung abzuwarten.

Software Defined Radio-Systeme stellen in ihrer Gesamtheit ein interdisziplinäres Feld dar, das von der Antennenentwicklung bis zur Schnittstelle für die Nutzerdaten

reicht. Dies umfasst in erster Linie die Fachgebiete *Hochfrequenztechnik*, *technische Elektronik*, *digitale Signalverarbeitung* und *Nachrichtentechnik*, aber auch die Fachgebiete *Regelungstechnik*, *Embedded Systems*, *Signalprozessoren* und *Programmierung*. Die Vorlesung *Kommunikationselektronik*, aus der dieses Buch hervorgegangen ist, trägt deshalb auch den Untertitel *Von der Antenne bis zum Bit-Ausgang*.

Die Interdisziplinarität bringt es mit sich, dass die erforderlichen Kenntnisse im Curriculum der universitären Ausbildung über zahlreiche verschiedene Vorlesungen verstreut sind und nur selten *kohärent* vermittelt werden. Diese Lücke versucht das vorliegende Buch zu schließen. Darüber hinaus gibt es einige Teilbereiche, die in der universitären Ausbildung nur unzureichend abgedeckt werden. Dazu gehört vor allem der Teilbereich Abstraten-Konversion und Abstraten-Regelung, aber auch der Teilbereich Präambel-Korrelation und Präambel-Detektion bei Paket-Sendungen. Diese Teilbereiche bilden die Schwerpunkte des Buchs.

Für die universitäre Ausbildung, aber auch für das Selbststudium, ist die praktische Anwendung für das Verständnis von zentraler Bedeutung. Etwas überspitzt könnte man sagen: *Was man nicht selbst programmiert hat, hat man auch nicht verstanden*. Wir versuchen dem mit zwei Maßnahmen gerecht zu werden. Zum einen machen wir umfangreichen Gebrauch von *MathWorks Matlab* bzw. dem Open-Source-Äquivalent *GNU Octave*, und zwar nicht nur in separaten Beispielen, sondern auch im Zusammenhang mit sämtlichen Abbildungen von Signalverläufen, Spektren und Kurven jeglicher Art, die allesamt mit *Matlab/Octave*-Skripten erzeugt wurden, die über die begleitende Web-Seite www.sdr-ke.de zum Download angeboten werden. Wir haben dabei darauf geachtet, dass die Skripten sowohl unter *Matlab* als auch unter *Octave* verwendet werden können. Für spezielle Funktionen – die sogenannten *mex*-Funktionen – stellen wir beide Varianten bereit.

Zum anderen möchten wir unsere Leser auch animieren, mit einer echten Telemetrie-Übertragung zu experimentieren und die Algorithmen zur Detektion und Demodulation von Paket-Sendungen unter Echtzeitbedingungen zu testen. Auf der Empfangsseite stehen dazu USB-Miniaturempfänger zur Verfügung, die zum Teil für unter 20€ angeboten werden und für die es bereits Software für eine Vielzahl von Anwendungen gibt. Stichwort für eine Internet-Recherche ist *rtl-sdr*. Die Webseiten www.rtl-sdr.com und rtlsdr.org bieten einen Einstieg. Wir stellen Funktionen für *Matlab* und *Octave* zur Verfügung, mit denen die Empfangssignale dieser Empfänger in Echtzeit unterabgetastet, gefiltert und verarbeitet werden können. Zur Realisierung einer eigenen Telemetrie-Übertragung wird zusätzlich ein Sender benötigt. Hier steht mit der Funk-Armbanduhr *EZ430-Chronos* von *Texas Instruments* (siehe processors.wiki.ti.com/index.php/EZ430-Chronos) ebenfalls eine sehr preisgünstige Lösung zur Verfügung, die einschließlich des benötigten USB-Programmiermoduls zur Zeit (2016) zu einem Preis von 58\$ angeboten wird. Wir stellen diese Komponenten hier nicht weiter vor, sondern verweisen auf die begleitende Web-Seite www.sdr-ke.de, auf der wir zusätzlich auch noch auf weitere preisgünstige

Komponenten zum Aufbau und Betrieb einer eigenen Telemetrie-Übertragungsstrecke hinweisen.

Wir danken Herrn Gerd Kilian und Herrn Jörg Robert für ihre Unterstützung bei der Konzeption des Buchs und ihre zahlreichen Hinweise. Darüber hinaus danken wir Frau Eva Hestermann-Beyerle und Herrn Michael Kottusch vom Verlag für die freundliche Aufnahme des Buchs.

Erlangen und Ebermannstadt im August 2016,

Albert Heuberger
Eberhard Gamm

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	<i>Software Defined Radio</i> -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	<i>Matlab</i> und <i>Octave</i>	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 <i>Software Defined Radio</i>-Systems	35
3.1	Blockschaltbilder eines <i>SDR</i> -Systems	37
3.2	Basisbandsignale und Trägersignale	38
3.2.1	Amplituden- und Frequenzmodulation	39
3.2.2	<i>I/Q</i> -Modulation	40
3.2.3	Spektren des Basisbandsignals und des Trägersignals	43
3.2.4	<i>I/Q</i> -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 <i>SDR</i> -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	Sensornetzwerke	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 <i>Matlab/Octave</i>	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 <i>Matlab/Octave</i>-Funktionen	365
C.1 <code>sig</code> – Signale und Spektren	366
C.2 <code>sdr</code> – Aufbau und Signale eines SDR-Systems	367
C.3 <code>ueb</code> – Übertragungsstrecke	369
C.4 <code>daten</code> – Leistungsdaten eines Empfängers	370
C.5 <code>ddc</code> – Digital Downconverter	371
C.6 <code>demod</code> – Demodulation	372
Literatur	375
Sachverzeichnis	377