

OFDM-Verfahren für die schmalbandige Datenübertragung im elektrischen Energieversorgungsnetz

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von

Martin Hoch

Erlangen – 2011

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 29. 08. 2011

Tag der Promotion: 14. 11. 2011

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Johannes Huber
	Prof. Dr.-Ing. Lutz Lampe

Erlanger Berichte aus Informations- und Kommunikationstechnik

Band 32

Martin Hoch

OFDM-Verfahren für die schmalbandige Datenübertragung im elektrischen Energieversorgungsnetz

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2012

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0886-9

ISSN 1619-8506

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

OFDM-Verfahren für die schmalbandige Datenübertragung im elektrischen Energieversorgungsnetz

Martin Hoch

Kurzfassung

Das elektrische Energieversorgungsnetz stellt aus Sicht eines Datenübertragungsverfahrens einen frequenzselektiven zeitvarianten Übertragungskanal dar. OFDM-Verfahren eignen sich deshalb sehr gut zur Übertragung über einen solchen Kanal, weil die Frequenzselektivität einfach entzerrt werden kann.

Zur schmalbandigen Übertragung von geringen Datenmengen empfiehlt es sich, ein inkohärent arbeitendes System zu verwenden, da es keine Trainingssequenz zur Kanalschätzung benötigt. Dies ist mit OFDM mit zyklischem Präfix in Kombination mit differentieller Phasenmodulation möglich.

Eine Alternative, Unique-Word-OFDM, verwendet anstelle von zyklischen Präfixen ein feststehendes Wort, das zur Kanalschätzung genutzt werden kann. Allerdings ist mit der speziellen Signalerzeugung ein Störabstandsverlust verbunden, der nur durch aufwändige Detektionsverfahren in einen Gewinn überführt werden kann.

Ein weiteres interessantes Verfahren ist Wavelet-OFDM, weil sich bei diesem aufgrund seiner langen Grundimpulse das Spektrum des Sendesignals hervorragend formen lässt. Es bringt aber bei kurzen Datenpaketen einen großen Überhang mit sich, zumal es nicht inkohärent detektiert werden kann, also eine Trainingssequenz benötigt.

Auf OFDM mit zyklischem Präfix und differentieller Phasenmodulation basieren die Bitübertragungsschichten der Systeme „PLC G3“ und „PRIME“. Im Vergleich anhand der Spezifikationen und mittels Simulationsergebnissen stellt sich „PLC G3“ als das zuverlässigere System heraus.

Zur Entzerrung der Zeitvarianz des Kanals wird lineare Entzerrung und Mehrsymboldetektion an einem einfachen Kanalmodell untersucht sowie Schätzverfahren zur Ermittlung der Zeitvarianz.

OFDM Techniques for Narrow-Band Power Line Communications

Martin Hoch

Abstract

In Power Line Communications (PLC) the power distribution grid is modelled by a frequency-selective time-variant channel. Therefore, OFDM techniques are suited very well for this application since they equalize the frequency-selective behaviour in a simple fashion.

For narrow-band PLC, where only little amounts of data are to be transmitted, it is advantageous to employ a non-coherent system that does not need a training sequence for channel estimation. Such type of system can be brought up with Cyclic-Prefix OFDM in combination with Differential Phase-Shift Keying (DPSK).

In an alternative, Unique-Word OFDM, the guard interval is not filled by a cyclic prefix, but a “unique word”, which can be deployed for channel estimation. However, there is a loss in signal-to-noise power ratio due to the special type of signal generation. This loss can be more than regained in principle, but only by applying expensive detection.

Another interesting technique is Wavelet-OFDM as its transmit spectrum can be formed outstandingly because of extended transmit pulses. This implies a large overhead when short packets of data are transmitted – additionally to a training sequence, for non-coherent detection is not possible.

Cyclic-Prefix OFDM and DPSK are the basis of the Physical Layers of the PLC systems “PLC G3” and “PRIME”. Comparing their specifications and analyzing simulation results “PLC G3” turns out to be the more reliable system.

In order to equalize the time-variant behaviour of the power line channel, linear equalization and Multiple Symbol Differential Detection is studied as well as algorithms to estimate the time-variant envelope.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Überblick	1
2	Das Energieversorgungsnetz als Übertragungskanal	3
2.1	Eigenschaften des Übertragungskanals	3
2.2	Modellierung der Datenübertragung	5
2.3	Motivation des Einsatzes von OFDM	7
3	OFDM mit zyklischem Präfix	11
3.1	Beschreibung des Verfahrens	11
3.1.1	Grundimpulse und Orthogonalität	11
3.1.2	Beschreibung als Verfahren zur Blockübertragung	12
3.1.3	Das zyklische Präfix und seine Vorteile	12
3.1.4	Spektrale Effizienz	14
3.1.5	DMT	15
3.2	Spektrale Formung durch Fensterung	16
3.2.1	Spektrale Formung bei CP-OFDM	16
3.2.2	Verbesserung durch sendeseitige Fensterung	16
3.2.3	Empfangsseitige Fensterung	18
3.3	Spitzenwertfaktor und -reduktionsverfahren	20
3.3.1	Spitzenwertfaktor	20
3.3.2	Reduktion des Spitzenwertfaktors mit Selected Mapping	22

3.4	Inkohärente Detektion	25
3.4.1	Prinzip	25
3.4.2	f - und t -DPSK	25
3.4.3	Differentielle Detektion	26
3.4.4	Eigenschaften von f - und t -DPSK	27
3.5	Beurteilung	31
4	Unique-Word-OFDM	33
4.1	Beschreibung des Verfahrens	33
4.1.1	Das Unique-Word-Konzept	33
4.1.2	Empfängerstrategien	35
4.2	Exkurs: Entzerrungsverfahren für MIMO-Systeme	37
4.3	MIMO-Entzerrung bei UW-OFDM	41
4.4	Beurteilung	44
5	Wavelet-OFDM	45
5.1	Beschreibung des Verfahrens	45
5.1.1	Grundimpulse und Orthogonalität	45
5.1.2	Spektrale Effizienz	48
5.1.3	Spektrale Formung	49
5.1.4	Übertragung über frequenzselektive Kanäle	49
5.1.5	Implementierungsaspekte	52
5.2	Spitzenwertfaktor und -reduktionsverfahren	53
5.2.1	Theoretischer Spitzenwertfaktor	53
5.2.2	Statistischer Spitzenwertfaktor	53
5.2.3	Spitzenwertreduktion mit SLM	58
5.3	Detektion von DWMT	67

5.4	Inkohärente Detektion	69
5.5	Auswirkungen von nicht-idealer Synchronisation	71
5.5.1	Abtastphasenfehler	71
5.5.2	Abtastfrequenzfehler	71
5.5.3	Trägerfrequenzfehler	72
5.6	Beurteilung	75
6	Vergleich der PLC-Systeme PLC G3 und PRIME	77
6.1	PLC G3	77
6.2	PRIME	80
6.3	Vergleich	82
6.3.1	OFDM-Parameter und Spektrum	82
6.3.2	Differentielle Modulation	83
6.3.3	Codierung und Interleaving	85
6.3.4	Präambel	86
6.4	Simulationen	88
6.4.1	Synchronisation bei AWGN	89
6.4.2	PLC-typisches Störmodell	92
6.4.3	Schmalbandiger Störer	96
6.4.4	Frequenzselektive Kanäle	97
6.4.5	Periodisch zeitvarianter Kanal	100
6.5	Schlussfolgerungen	104
7	Entzerrung von zeitvarianten Kanälen	105
7.1	Problembeschreibung und -modellierung	105
7.1.1	Angepasstes Kanalmodell	105
7.1.2	Modell der Zeitvarianz	107

7.1.3	Systembeispiel	108
7.2	Entzerrung bei idealer Kenntnis der Zeitvarianz	112
7.2.1	MIMO-Entzerrung	112
7.2.2	Lineare Entzerrung	112
7.2.3	Detektion bei zeitvarianter Störung	114
7.2.4	Illustration am Systembeispiel	115
7.3	Blinde Entzerrung im logarithmischen Bereich	121
7.3.1	Methode	121
7.3.2	Ergebnisse für das Systembeispiel	122
7.3.3	Beurteilung	122
7.4	Verfahren zur Schätzung der Zeitvarianz	124
7.4.1	Schätzung im logarithmischen Bereich	124
7.4.2	Schätzung aus der Einhüllenden	127
8	Zusammenfassung und Ausblick	131
A	Beweise und Herleitungen	133
A.1	Äquivalenz von MIMO-LE und Wiener-Filterung bei UW-OFDM . .	133
A.2	Leistung des Sendesignals von Wavelet-OFDM	135
B	Illustration der Orthogonalität von Wavelet-OFDM	137
	Glossar	141
	Abkürzungsverzeichnis	141
	Symbolverzeichnis	144
	Sachliche und persönliche Hilfen	147
	Literaturverzeichnis	149