

Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays

Elias Ludwig Peter

Parallel Sequence Spread Spectrum

An Alternative Physical Layer for Wireless Communications

Parallel Sequence Spread Spectrum

An Alternative Physical Layer for Wireless Communications

von der Fakultät

für Elektrotechnik und Informationstechnik

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

Elias Ludwig Peter

Dortmund, 2023

Tag der mündlichen Prüfung: 23. November 2023

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Czylik

Dortmunder Beiträge zur Kommunikationstechnik

Band 22

Elias Ludwig Peter

Parallel Sequence Spread Spectrum

An Alternative Physical Layer for Wireless Communications

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2024

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9398-8

ISSN 1863-9054

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kommunikationstechnik der Technischen Universität Dortmund im Zeitraum von 2018 bis 2023.

Ich möchte mich von ganzem Herzen bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays dafür bedanken, dass er diese Arbeit ermöglicht, begleitet und begutachtet hat. Seine Betreuung durch zahlreiche wertvolle Diskussionen hat einen wesentlichen Teil zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Czyllwik, dem Leiter des Fachgebiets Nachrichtentechnische Systeme an der Universität Duisburg-Essen, für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Zudem bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Kommunikationstechnik für ihr Engagement, viele spannende Diskussionen und ein hervorragendes Arbeitsklima. Ferner danke ich allen Studierenden, deren Abschlussarbeiten ich betreuen durfte, sowie allen wissenschaftlichen und studentischen Hilfskräften, die mich mit ihrer Arbeit unterstützt haben.

Mein Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Gerd und Johanna, die mir das Studium ermöglicht haben und mich jederzeit in allen Belangen unterstützen. Außerdem möchte ich mich bei meiner Freundin Lena und meinem Freund Max bedanken, die mich zum Abschluss dieser Arbeit mit ihrem Lektorat unterstützt und ihrem Zuspruch motiviert haben.

Dortmund, Dezember 2023

Elias Ludwig Peter

Contents

Vorwort	i
Kurzfassung	ix
Abstract	xi
1 Introduction	1
1.1 Motivation	4
1.2 Outline and Contributions	7
1.3 Related Work	9
1.3.1 Initial Investigations	9
1.3.2 PSSS for Factory Automation	10
1.3.3 PSSS for THz Communications	11
2 The Parallel Sequence Spread Spectrum Concept	15
2.1 Introduction to Spread Spectrum Systems	15
2.1.1 Direct Sequence Spread Spectrum	16
2.2 The Parallel Sequence Spread Spectrum Physical Layer	18
2.2.1 PSSS Encoding	18
2.2.2 PSSS PHY Parameters	22
2.2.3 PSSS as a Multiple Access Scheme	24
2.2.4 PSSS Decoding and M-Sequence Non-Orthogonality	26
2.2.5 BER Performance in AWGN	29
3 Orthogonalization of PSSS	33
3.1 Iterative Symbol Detection	34
3.2 Orthogonal Parallel Sequence Spread Spectrum	38
3.2.1 Derivation via M-Sequence Run Length Property	38

3.2.2	Matched Filters Design Approach using Linear Algebra	40
3.3	AWGN Simulations	43
3.3.1	BER Performance Improvements	43
3.3.2	Spectral Benefits	46
3.4	Conclusion	46
4	Analysis of the PSSS Signal	47
4.1	System Model	48
4.2	Signal Characteristics	50
4.2.1	Amplitude Distribution	50
4.2.2	Peak-To-Average Power Ratio	51
4.3	Influence of the Power Amplifier and Clipping	56
4.3.1	Hard Clipping	56
4.3.2	Soft Clipping using the Rapp Model	58
4.3.2.1	Spectral Characteristics and Shoulder Level	60
4.3.2.2	BER Performance	61
4.4	Conclusion	63
5	Synchronization Concepts for PSSS Systems	65
5.1	PSSS-Based Preamble Design	66
5.1.1	Constraints on the Training Symbol Length	68
5.2	Carrier Frequency and Phase Synchronization	70
5.2.1	Expected Carrier Frequency Offset	71
5.2.2	Correlation-Based Carrier Frequency Estimation	72
5.2.2.1	Basic Principle	73
5.2.2.2	Accuracy Evaluation	76
5.2.2.3	Two-Stage Approach	78
5.2.3	PLL-Based Synchronization	79
5.2.4	Pilot Code-Based Carrier Synchronization	85
5.2.4.1	Pilot Code Insertion	85
5.2.4.2	Continuous Phase Correction	85
5.2.4.3	Accuracy Improvement by Averaging	86
5.2.4.4	Accuracy Loss due to a Chip Timing Offset	88

5.3	Symbol Timing Synchronization	89
5.3.1	Pilot Code-Based Chip Synchronization	90
5.3.1.1	Influence of Noise	92
5.3.1.2	Accuracy Improvement by Averaging	94
5.4	Conclusion	95
6	PSSS in Industrial Environments	97
6.1	The Wireless Multipath Channel Impulse Response	98
6.1.1	Time Dispersion Parameters and Coherence Bandwidth	99
6.1.2	Doppler Spread and Coherence Time	100
6.2	Overview of Industrial Wireless Channel Models	102
6.2.1	TU Dortmund Measurement Campaign	103
6.2.2	IEEE 802.15.4a CM7 & CM8	104
6.2.3	IEEE 802.11 Channel Model E	105
6.2.4	QuaDriGa Channel Model	107
6.2.5	TU Dresden Channel Model	108
6.3	Comparison of Industrial Channel Models	109
6.3.1	Time Dispersion in Industrial Wireless Channels	109
6.3.2	Coherence Time in Industrial Applications	113
6.4	Industrial Channels for Baseband Simulations	114
6.5	PSSS Equalizer Design for Industrial Wireless Channels	119
6.5.1	PSSS in Multipath Channels	120
6.5.1.1	Channel Estimation	120
6.5.1.2	Equalizer Concepts for PSSS	123
6.5.1.3	PSSS Prefix Options	125
6.5.1.4	PSSS without a Prefix	127
6.5.1.5	PSSS with a Cyclic Prefix	129
6.5.1.6	PSSS with Zero Padding	130
6.5.2	Simulation Results	132
6.6	Conclusion	136
7	Performance Comparison of PSSS and OFDM	137
7.1	Performance Comparison of Uncoded CP-PSSS and OFDM	138

7.2	Performance Measurements using System Emulator Hardware .	142
7.2.1	Measurement Setup and System Parameters	143
7.2.2	Error Patterns of PSSS and OFDM	143
7.2.3	Measured Bit Error Performance of PSSS and OFDM .	146
7.3	BER Performance of Coded OPSSS and OFDM	148
7.4	Conclusion	152
8	Conclusion	155
8.1	Summary	155
8.2	Outlook and Discussion	158
	Appendix A	160
A	Industrial Applications and Requirements	161
B	Synchronization	165
B.1	Analytical Description of the Frequency Estimation	165
B.2	Decision Directed Phase Error Detectors	166
B.3	PSSS Spectral Characteristics using Pilot Codes	168
C	Industrial Wireless Channels	171
D	Additional Performance Evaluation	175
D.1	BER Performance of OFDM for Different Interleaver Distances	175
	List of Abbreviations	179
	List of Symbols	185
	List of Figures	195
	List of Tables	199
	Bibliography	201
	Publications by the Author	225

Student Works Supervised by the Author	227
Curriculum Vitae	229

Kurzfassung

PSSS (Parallel Sequence Spread Spectrum) ist ein neuartiges Verfahren der Signaltransformation. Dieses Code-Multiplexing-Verfahren basiert auf überlagerten Spreizsequenzen zur parallelen Übertragung von Daten mit einem einzigen Träger. Es bietet eine flexible Ressourcenzuweisung durch Aufteilung des verfügbaren Spektrums auf eine Reihe synchroner, zyklisch zueinander verschobener Codes bei minimaler Interferenz und wird daher als eine Alternative zu OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing) angesehen. Als Spreizverfahren hat es das Potenzial, sich an veränderte Übertragungsbedingungen und spezifische Anwendungsfälle anzupassen.

In der PSSS-bezogenen Forschung werden zwei Anwendungsszenarien untersucht: industrielle drahtlose Kommunikation in Fertigungszellen und THz-Kommunikation mit hoher Datenrate. Im ersten Fall wird PSSS auf sein Potenzial hin untersucht, ein flexibles, codebasiertes Mehrfachzugriffsverfahren zu realisieren. Zu den weiteren möglichen Vorteilen zählen eine geringe Latenzzeit und Robustheit gegenüber Mehrwegeausbreitung. Im zweiten Fall wird PSSS im Kontext von Mixed-Signal-Processing erforscht, da es so speziell bei hohen Frequenzen und Datenraten energieeffizienter ist. Diese Arbeit steht im Zusammenhang mit den erstgenannten Forschungsbemühungen im Bereich der industriellen drahtlosen Kommunikation.

Die Prinzipien der PSSS-Methode werden dabei von Grund auf analysiert. Die ursprünglich nicht orthogonalen, bipolaren m -Sequenzen, welche in PSSS Anwendung finden, werden orthogonalisiert. Dies ermöglicht erstmalig eine komplexe Modulation höherer Ordnung in einem PSSS-System. Die Eigenschaften des bandbegrenzten, impulsgeformten Sendesignals und der Einfluss eines nichtlinearen Verstärkers werden untersucht. Das System wird in diesem

Zusammenhang mit OFDM verglichen. Es werden neuartige Synchronisationskonzepte für PSSS entwickelt, darunter eine PSSS-basierte Präambel sowie Methoden, die Pilotcodes verwenden. Im Kontext der industriellen Funkkommunikation werden verschiedene Kanalmodelle auf ihre Eignung für das Anwendungsszenario von PSSS verglichen. Unter Verwendung repräsentativer Kanalimpulsantworten wird weiterhin die Leistungsfähigkeit verschiedener Entzerrungstechniken durch Simulationen verglichen. Zum ersten Mal wird das Potenzial von MLSE (maximum likelihood sequence estimation) in Kombination mit PSSS untersucht. Die Notwendigkeit eines CP (cyclic prefix), wie es im ursprünglichen PSSS-Entwurf spezifiziert ist, wird schließlich in Frage gestellt und alternative effizientere Konzepte für die physikalische Schicht werden bereitgestellt. Durch Messungen und Simulationen wird das Verfahren abschließend mit der verbreiteteren OFDM-Methode unter Verwendung geeigneter Systemparameter verglichen, was das Potenzial des PSSS-Ansatzes für die zukünftige drahtlose Kommunikation zeigt.

Abstract

PSSS (Parallel Sequence Spread Spectrum) is a novel signal transform. This code multiplexing technique is based on superimposed spreading sequences to transmit data in parallel, using only a single carrier. It offers a flexible resource allocation, by sharing the available spectrum between a set of synchronous, cyclic codes with minimal interference and is therefore considered as an alternative to OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing). As a spread spectrum technique, it has the potential to adapt to changing transmission conditions and specific use cases.

PSSS related research investigates two application scenarios: industrial wireless communications in factory automation cells and high data rate THz communications. In the former, PSSS is studied for its potential to provide a flexible code-based multiple access scheme, reduced latency, energy efficiency and robustness against multipath fading. The latter analyzes PSSS for mixed-signal processing, as it is potentially more energy efficient at high frequency and data rates. This thesis is related to the research effort on industrial wireless communications.

The fundamentals of the PSSS method are examined from the ground up. The initially non-orthogonal, bipolar m-sequences used in PSSS are adjusted for orthogonality. This enables complex higher order modulation for the first time in a PSSS system. The characteristics of the pulse-shaped transmit signal and the influence of a nonlinear amplifier are studied. The system is compared with OFDM in this context. Novel synchronization concepts for PSSS are developed, including a PSSS-based preamble as well as methods using pilot codes. In the context of industrial wireless, different channel models are compared for their suitability to the application scenario of industrial PSSS.

Using representative channel impulse responses, the performance of different equalization techniques is compared through simulations. For the first time, the potential of MLSE (maximum likelihood sequence estimation) in combination with PSSS is explored. The necessity of a CP (cyclic prefix), as specified in the original PSSS design, is called into question and alternative more efficient physical layer designs are provided. Through measurements and simulations, the method is compared with the more common OFDM method, using suitable system parameters, demonstrating the potential of the PSSS approach for future wireless communications.