
Erlanger Berichte aus Informations-
und Kommunikationstechnik
Herausgeber: A. Kaup, W. Koch, J. Huber

Band 39

Christoph Rachinger

**Power Efficient Digital Transmission for
MIMO Systems using Spherical Codes**

Leistungseffiziente digitale Übertragung für
Mehrantennensysteme mittels sphärischer Codes

Shaker Verlag

Power Efficient Digital Transmission for MIMO Systems using Spherical Codes

Leistungseffiziente digitale Übertragung
für Mehrantennensysteme mittels sphärischer Codes

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

DR.–ING.

vorgelegt von

CHRISTOPH RACHINGER

aus Nürnberg (Bayern)

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

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Januar 2018

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Johannes B. Huber
Prof. Dr.-Ing. Ralf R. Müller
Prof. Giuseppe Caire, Ph.D.

Erlanger Berichte aus Informations- und Kommunikationstechnik

Band 39

Christoph Rachinger

**Power Efficient Digital Transmission for
MIMO Systems using Spherical Codes**

Leistungseffiziente digitale Übertragung für
Mehrantennensysteme mittels sphärischer Codes

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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 978-3-8440-5964-9

ISSN 1619-8506

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

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

Danksagung

Diese Arbeit ist während meiner vierjährigen Tätigkeit am Lehrstuhl für Informationsübertragung (später: Lehrstuhl für Digitale Übertragung) entstanden. Deswegen möchte ich zuallererst Prof. Johannes Huber danken, der nicht nur - nicht zuletzt auf Grund seiner auch im Ruhestand noch anhaltenden Leidenschaft für die Lehre - mein Interesse an der Informations- und Codierungstheorie erweckt hat, sondern mir auch die Chance gegeben hat, die Tätigkeit am Lehrstuhl aufzunehmen.

Ihm und Prof. Ralf Müller möchte ich mich sowohl für unzählige spannende, lehrreiche, aber auch einfach nur unterhaltsame Momente bedanken - sei es im Vorlesungssaal der Uni oder auf der Skipiste am Spitzingsee. Zu jeder Zeit konnte ich auf das breite Wissen und die hilfreiche, offene Art beider Professoren zählen.

In den vier Jahren am Lehrstuhl hatte ich außerdem das Glück mit vielen tollen Kollegen zu arbeiten, dank denen mir die Zeit im Büro (oder der Kaffeepause) selten als echte "Arbeit" vorkam und die nie um eine fachliche oder auch persönliche Diskussion verlegen waren. Besonderer Dank geht dabei an die letzten LIT-Überbleibsel Andreas, Florian und Clemens, sowie meinen Zimmerkollegen Bernhard.

Einen großen Anteil an dieser Arbeit haben natürlich auch meine Eltern, die mich bisher bei jeder Entscheidung unterstützt haben, und ohne die ich heute nicht so weit gekommen wäre.

Und als letztes geht mein Dank an Vera: Die letzten vier Jahre zusammen waren wunderschön mit dir, und ich freue mich auf jeden weiteren Tag zusammen.

Kurzfassung (in German)

In dieser Arbeit werden sog. *sphärische Codes*, d.h. Codes, deren Codewörter auf der Oberfläche einer Hyperkugel im mehrdimensionalen euklidischen Raum verteilt sind, hinsichtlich ihrer Eignung als Modulationsalphabet für die digitale Übertragung über Mehrantennensystemen untersucht. Die Nutzung solcher Modulationsalphabete wird in Anlehnung an die klassische Phasenumtastung (engl. Phase Shift Keying, PSK) als *Phase Shift Keying on the Hypersphere* (PSKH) bezeichnet. PSKH kann in Kombination mit geeigneten Verstärkern in der Endstufe des Senders, sog. lastmodulierenden Verstärkern, die Leistungseffizienz des Übertragungssystems verbessern.

Zunächst werden in dieser Arbeit verschiedene Ansätze untersucht, wie geeignete sphärische Codes mittels analytischer oder numerischer Methoden erzeugt werden können. Bei der Auswahl passender Codes als Modulationsalphabet müssen unter Umständen diverse Kompromisse eingegangen werden: Sphärische Codes mit guten Distanzeigenschaften besitzen häufig keinerlei Struktur, die es ermöglicht, sie effizient im Speicher abzulegen, oder mit deren Hilfe effiziente Detektionsalgorithmen genutzt werden können. Außerdem resultieren gute Distanzeigenschaften wider der intuitiven Erwartung nicht notwendigerweise in hoher Leistungseffizienz bei codierter Übertragung. Aus diesem Grund beinhaltet diese Arbeit neben einer kurzen Betrachtung der theoretischen Grenzen von PSKH eine ausführliche Diskussion über die Vor- und Nachteile verschiedener Ansätze der codierten Modulation unter Betrachtung der zugrunde liegenden sphärischen Codes. Weiterhin stellen wir zwei Algorithmen vor, welche eine Quantisierung beliebiger sphärischer Codes ohne Struktur mit niedriger Komplexität ermöglichen.

Für die effektive Ausnutzung von lastmodulierenden Verstärkern ist es jedoch noch nicht ausreichend, PSKH als Modulationsverfahren zu nutzen. Daher beinhaltet diese Arbeit auch einen Vergleich verschiedener Modifikationen der Signalerzeugung, die, ausgehend von der klassischen Pulsamplitudenmodulation, das Ziel besitzen, das Verhältnis von Summenspitze zu mittlerer Summenleistung (*Peak-to-Average-Sum-Power-Ratio*, PASPR) zu reduzieren. Der PASPR-Wert eines Sendesignals ist die entscheidende Kennzahl, welche angibt, mit welchem Wirkungsgrad ein lastmodulierender Verstärker genutzt werden kann. Das PASPR hat damit einen direkten Einfluss auf die Leistungseffizienz des Gesamtsystems. Die von uns vorgestellten Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich Leistungseffizienz, Bandbreiteneffizienz und Empfängerkomplexität. Mit Hilfe numerischer Simulationen wird der gegenseitige Austausch dieser drei Faktoren aufgezeigt.

Die letzte in dieser Arbeit vorgestellte Neuheit ist die digitale Übertragung mit Hilfe zeitvarianter PSKH-Konstellationen. Durch die Wahl geeigneter Rotationen eines Aus-

gangssymbolalphabets kann das PASPR deutlich reduziert werden, ohne dass die Pulsamplitudenmodulation verändert werden müsste. Dies erlaubt Datenübertragung ohne Intersymbolinterferenz und ohne Erhöhung der Bandbreite verglichen mit konventionellen Ansätzen. Auch für diese Modulationsart gibt es einen Austausch von Empfängerkomplexität gegen Leistungseffizienz. Dieser Austausch wird in dieser Arbeit näher untersucht, indem verschiedene Empfangsalgorithmen vorgestellt und hinsichtlich Leistungseffizienz und Komplexität verglichen werden. Dies geschieht sowohl für den uncodierten als auch für den codierten Fall.

Abstract

In this thesis, we investigate whether so-called *spherical codes*, i.e., codes with code words that are distributed over the surface of a multidimensional hypersphere in a Euclidean space, are suited as modulation alphabets for digital transmission over multiple-antenna systems. Using spherical codes as a modulation alphabet is called *Phase Shift Keying on the Hypersphere* (PSKH), because it can be understood as a generalization of conventional Phase Shift Keying (PSK). If PSKH is used in combination with suitable amplifiers in the output stage of a transmitter, so-called load modulated amplifiers, the power efficiency of a digital transmission system can be improved.

In the first part of this work, we examine various approaches to generate spherical codes with the help of analytical and numerical construction methods. If one chooses to use spherical codes as modulation alphabet, it might be necessary to compromise on certain design targets: Spherical codes with good distance properties might not be structured in a way that they can be efficiently stored in memory or that they can be used in combination with known low-complexity detection algorithms. Additionally, good distance properties of spherical codes might not necessarily result in high power efficiency when used for coded transmission. Therefore, this work does not only include a short description of the theoretical limits of PSKH, but an elaborate discussion about the advantages and disadvantages of different approaches to coded modulation for spherical codes. Additionally, we introduce two algorithms for low-complexity quantization of spherical codes that lack any structure.

In order to fully exploit load modulated transmitters, it is not sufficient to use PSKH as a modulation alphabet. Therefore, the second part of this work contains a comparison of modifications to conventional pulse amplitude modulation which allow to reduce the ratio of the peak sum power of the output signal to its mean sum power (*Peak-to-Average-Sum-Power-Ratio*, PASPR). The PASPR of the transmit signal determines with which efficiency the load modulated amplifier can be used. It has thus a direct influence on the power efficiency of the total transmission system. The methods proposed in this thesis differ in power efficiency, spectral efficiency and receiver complexity. Numerical simulations are used to illustrate the trade-off between these three factors.

The last part of this work introduces a novel modulation scheme which uses time-variant PSKH constellations. By using suitable rotations of a base constellation, the PASPR of the output signal can be significantly reduced without having to modify the pulse shaping procedure at the transmitter. This allows for digital transmission of data without intersymbol interference and without any increase of the required bandwidth compared

to other approaches. Again, there is a trade-off between receiver complexity and power efficiency for this new modulation scheme. This trade-off is investigated in detail by comparing various receiver algorithms with respect to the resulting power efficiency and complexity. This is done both for the uncoded as well as for the coded case.

Contents

Kurzfassung (in German)	i
Abstract	iii
1 Introduction and Motivation	1
2 Fundamentals of MIMO Systems	5
2.1 Motivation for MIMO	5
2.2 Channel Model and Notation	6
2.3 Load Modulated MIMO	10
2.4 Symbol Detection for MIMO Systems	12
2.4.1 SVD-based Channel Decomposition	12
2.4.2 Linear Detection	12
2.4.3 Maximum Likelihood Detection	13
2.4.4 Sphere Decoding	15
3 Constellations on the Hypersphere	17
3.1 n -dimensional Spheres	17
3.1.1 General Properties and Notation	18
3.1.2 Spherical Coordinates	19
3.1.3 Spherical Interpolation	19
3.2 Sphere Partitioning	20
3.2.1 Per Antenna-PSK	21
3.2.2 Equal Area Sphere Partitioning	21
3.2.3 Spherical k-means Clustering	23
3.2.4 Potential Minimization	25
3.2.5 Comparison	27
3.3 Bit Mapping	28
4 Low Complexity Quantization of Arbitrary Spherical Codes	29
4.1 Quantized Sphere Decoder	32
4.2 Clustering Decoder	36
4.3 Comparison and Results	38
5 Phase Shift Keying on the Hypersphere (PSKH)	43
5.1 Continuous Constellations on the Hypersphere	44
5.2 Mutual Information of Discrete PSKH	47

5.2.1	AWGN Channel	48
5.2.2	Rayleigh Channel	49
5.3	Uncoded Transmission	50
5.3.1	AWGN Channel	51
5.3.2	Rayleigh Channel	51
5.4	Conclusion and Summary	52
6	Coded Modulation for PSKH	53
6.1	Bit-Interleaved Coded Modulation for PSKH	53
6.1.1	BICM Bit Mappings for BICM	53
6.1.2	Performance Analysis of BICM for PSKH	54
6.1.3	Optimizing PSKH Constellations for BICM	60
6.1.4	Capacity and Power Efficiency of BICM-optimized Constellations	64
6.1.5	BICM with Iterative Decoding	66
6.2	Natural Coded Modulation using Non-Binary Codes	66
6.3	Multilevel Coding for PSKH	70
6.3.1	Bit Mappings for MLC	71
6.3.2	Bit Mapping Capacities for MLC	77
6.3.3	Finite-Length Aspects of Mapping and Constellation on MLC	78
6.3.4	Numerical Results	82
6.3.5	MLC with Iterative Detection	85
6.4	Summary	86
7	Pulse Shaping for PASPR Reduction of PSKH	89
7.1	Conventional Pulse Amplitude Modulation	90
7.1.1	RRC-Shaping	90
7.1.2	sinc^2 -Shaping	90
7.2	$T_s/2$ -filtered Pulse Shaping	92
7.2.1	Upper Error Bound for $T_s/2$ -Pulse Shaping	92
7.2.2	Interpretation of the Diversity Gain of $T_s/2$ -Pulse Shaping	94
7.3	Spherical Interpolation Pulse Shaping	96
7.3.1	Transmission Model	96
7.3.2	Further Complexity Reduction	100
7.4	Comparison of PASPR and Occupied Spectrum	102
7.5	Spectral Efficiencies	104
7.6	Conclusion	105
8	$\frac{\pi}{2}$-shifted Phase Shift Keying on the Hypersphere	107
8.1	$\frac{\pi}{2}$ -PSKH Signals	108
8.1.1	Signal Generation	108
8.1.2	PASPR Evaluation	113
8.2	Theoretical Analysis of the PASPR of Adjacent Symbols	114
8.3	Mutual Information of $\frac{\pi}{2}$ -PSKH	118
8.4	Symbol Detection	121
8.4.1	Single Symbol Detector	122
8.4.2	Sphere Detection	122
8.4.3	Single Alternative Detector	123
8.4.4	Complexity Reduction	124

8.5	Results	125
8.5.1	Power Efficiency and Complexity	125
8.5.2	Influence of the Dummy Symbol	127
8.5.3	Spectral Efficiency	129
9	Coded Transmission for $\frac{\pi}{2}$-PSKH	131
9.1	Sequence Estimation of Coded $\frac{\pi}{2}$ -PSKH	131
9.1.1	LLR Calculation and Detection Algorithm	131
9.1.2	Coded $\frac{\pi}{2}$ -PSKH without Dummy Symbols	133
9.1.3	Coded $\frac{\pi}{2}$ -PSKH with Dummy Symbols	136
9.2	Symbolwise Multilevel Coding for $\frac{\pi}{2}$ -PSKH	143
9.2.1	LLR Calculation	144
9.2.2	An Unoptimized Approach	145
9.2.3	Optimizing the Coding Rates	145
9.2.4	Complexity of MLC- $\frac{\pi}{2}$ -PSKH	148
9.2.5	MLC- $\frac{\pi}{2}$ -PSKH with BICM-ID	149
9.3	Conclusion	149
10	Summary, Conclusion and Outlook	151
A	Supporting Material	153
A.1	Real-valued MIMO Channel Model	153
A.2	Exemplary Illustrations of PSKH Bit Mappings	155
A.3	Bounds on the PAPR for sinc and sinc ²	157
A.4	Calculation of the Pairwise Error Probability	160
A.5	Simulated Annealing	161
A.6	Codes Used in this Thesis	163
A.6.1	Turbo Codes	163
A.6.2	Turbo Codes for Multilevel Coding	163
A.6.3	Non-Binary LDPC Codes	164
B	Abbreviations and Glossaries	165
B.1	Acronyms	165
B.2	Variables, Vectors, Matrices and Sets	167
B.3	Operators, Functions and Mappings	169
	Publications of the Author	169
	Bibliography	172