

Diversity Embedding for Broadband Communication

THÈSE N° 4136 (2008)

PRÉSENTÉE LE 27 JUIN 2008

À LA FACULTE INFORMATIQUE ET COMMUNICATIONS
LABORATOIRE DES SYSTÈMES D'INFORMATION ET DE COMMUNICATION
PROGRAMME DOCTORAL EN INFORMATIQUE, COMMUNICATIONS ET INFORMATION

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Sanket DUSAD

M.Sc., University of Illinois, Urbana-Champaign, Etats-Unis
et de nationalité indienne

acceptée sur proposition du jury:

Prof. B. Rimoldi, président du jury
Prof. S. Diggavi, directeur de thèse
Prof. E. Biglieri, rapporteur
Prof. R. Calderbank, rapporteur
Prof. R. Urbanke, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse
2008

Abstract

Given uncertainty in environment, a conservative approach is to design for the worst case, leading to a game-theoretic situation where the environment is controlled by an adversary. However, in many cases, the uncertainty arises from randomness, not an adversary. Wireless fading channels are an example of such a system, where the random fading causes uncertainty (at the transmitter) about rates supported by the channel. The question asked in the thesis is if this difference can be utilized to design communication schemes that opportunistically utilize the randomness, while giving some guarantees in performance for a worst case situation.

The use of multiple transmit and receive antennas to deliver higher data rate at higher reliability, while transmitting over wireless channels, has been an extremely active research area over the past decade. The codes designed for such systems are referred to as space time codes. Diversity order, which captures reliability in terms of error performance, and rate impose a fundamental trade-off in space-time coding. High-rate space-time codes come at a cost of lower diversity order, and high reliability (diversity order) results in a lower rate. Over the past few years, this trade-off has been quite well understood for flat fading channels while far less attention has been given to Inter Symbol Interference (ISI) or broadband channels.

Given the tradeoff between rate and reliability, if the overall system is designed for a fixed rate-diversity operating point it might be over-provisioning a resource which could be flexibly allocated to different applications. A new paradigm for the design of wireless links is proposed in this thesis which makes it possible to design a high rate code with an embedded high reliability code. This allows a form of communication where the high-rate code opportunistically takes advantage of good channel realizations whereas the embedded high-diversity code ensures that at least part of the information is received reliably.

In this thesis the problem is studied from the point-of-view of information theoretic bounds on performance as well as explicit algebraic code designs for flat fading and ISI channels. Construction of a class of space-time codes which can flexibly allocate rate and reliability to an application is given. The constructions can be viewed as a generalization of classical multi-level codes to

the fading multiple antenna channel. A systematic class of such codes is given using a construction which lifts rank properties of sets of binary matrix to the complex domain. These codes permit flexible allocation of rate and reliability for different streams. Diversity embedded codes for broadband (ISI) channels are developed by constructing maximal sets of Toeplitz binary matrices with rank guarantees. These constructions might be of independent interest in other distributed settings.

From an information-theoretic point of view a channel is said to be successively refinable if it is possible to operate simultaneously at multiple points on the rate reliability tradeoff. In this thesis it is shown that the diversity multiplexing tradeoff for ISI channels with single degree of freedom, *i.e.*, one transmit and many receive antennas or many transmit and one receive antennas, is successively refinable. This implies that one can design almost ideal opportunistic coding strategies for broadband (ISI) wireless channels. This observation could have an impact on the operation of broadband wireless links. The techniques developed for proving the result could also contribute to an understanding and design of schemes for systems with multiple transmit and receive antennas.

Finally, the system implications of embedded diversity codes are explored by examining value to unequal error protection, rate opportunism, cell coverage extension and packet delay optimization. The delivery of images using a layered source coder, matched with appropriate choices of diversity embedded codes, is investigated and the benefits of the diversity embedded codes are illustrated. These applications demonstrate that diversity-embedded codes have the potential to outperform traditional single-layer codes in moderate SNR regimes.

Keywords: Fading channels, wireless communications, broadband (ISI) channels, space-time codes, opportunistic communication, rate-diversity trade-off, unequal error protection, multilevel codes.

Résumé

Si l'environnement est incertain, une approche conservatrice est de faire une architecture pour le pire des cas. Ceci amène à une situation comme en théorie des jeux, où l'environnement est contrôlé par un adversaire. Mais souvent, l'incertitude est aléatoire, et n'est pas due à un adversaire. Des canaux de fading en communications sans fil sont un exemple d'un tel système, où le fading aléatoire est la cause de l'incertitude (auprès du transmetteur) concernant les taux qui sont possibles sur le canal. La question que nous nous posons dans cette thèse est si cette différence peut être utilisée afin de créer des systèmes de communication qui utilisent l'aléatoire de façon opportuniste, tout en garantissant une certaine performance dans le pire des cas.

L'utilisation de plusieurs antennes de transmission et de réception dans la communication sans fil afin d'envoyer plus de données avec plus de fiabilité a été un domaine de recherche extrêmement actif dans les dix dernières années. Les codes adaptés à des tels systèmes sont appelés des codes Space Time. L'ordre de diversité, qui indique la fiabilité en termes de la performance d'erreur, et le taux imposent une tension fondamentale en codage Space Time. Le coût pour des codes à taux élevé est un ordre de diversité inférieur, et une haute fiabilité (un ordre de diversité élevé) implique un taux plus bas. Au cours des dernières années, cette tension a été assez bien étudiée pour les canaux à fading plat. Cependant, les canaux Inter Symbol Interference (ISI) ou les canaux Broadband ont vu beaucoup moins d'attention.

Etant donné la tension entre taux et fiabilité, si le système a été conçu pour un point d'opération taux-diversité fixe, alors il se peut que le système sur-provisionne une ressource qui pourrait être allouée de façon flexible à des différentes applications. Dans cette thèse, nous proposons un nouveau paradigme pour la conception de liens sans fil qui permet la construction d'un code à taux élevé dans lequel un code à haute fiabilité est encastré. Ceci permet une communication où le code à taux élevé utilise les réalisations favorables du canal de manière opportuniste, tandis que le code à haute diversité encastré assure qu'au moins une partie de l'information est reçue de façon fiable.

Dans cette thèse, nous étudions ce problème de deux points de vue : celui des bornes à la performance données par la théorie de l'information et celui des constructions explicites et algébriques de codes pour les canaux de fading

plat et les canaux ISI. Nous dérivons la conception d'une classe de codes Space Time qui peuvent allouer le taux et la fiabilité de manière flexible à une application. Ces constructions peuvent être vues comme une généralisation des codes multi-level classiques pour le canal multi-antenne de fading. Une classe systématique de tels codes est donnée en utilisant une construction qui transfère des propriétés de rang d'un ensemble de matrices binaires au domaine complexe. Ces codes permettent l'allocation flexible de taux et fiabilité pour des flux différents. Des codes à diversité encastrée pour les canaux Broadband (ISI) sont développés par la construction d'ensembles maximaux de matrices de Toeplitz binaires avec des assurances de rang. Les constructions peuvent être d'un intérêt général pour d'autres problèmes.

D'un point de vue de la théorie de l'information, on dit qu'un canal est raffnable successivement s'il est possible d'opérer au même temps à plusieurs points de la courbe taux-fiabilité. Dans cette thèse, nous montrons que la tension entre taux et diversité pour un canal ISI avec un seul degré de liberté, c'est-à-dire, avec une seule antenne de transmission et plusieurs antennes de réception, est raffnable successivement. Ceci implique que c'est possible de construire des codes opportunistes quasi-idéaux pour les canaux Broadband. Cette observation pourrait avoir une influence sur l'opération de liens sans fil. Les techniques développées pour obtenir ce résultat pourraient aussi contribuer à la compréhension et la conception de schémas pour des systèmes avec des multiples antennes de transmission et de réception.

Finalement, nous explorons les implications de codes à diversité encastrée sur les systèmes en examinant la valeur apportée à la protection d'erreurs non-égale, l'opportunisme de taux, la couverture cellulaire et l'optimisation du délai de packets. La transmission d'images en utilisant un encodeur de source à niveaux, adapté à un choix approprié de codes à diversité encastrée, est étudiée et les avantages des codes à diversité encastrée sont ainsi illustrés. Ces applications démontrent que les codes à diversité encastrée ont le potentiel de redoubler les codes traditionnels à un seul niveau dans le domaine de SNR modérées.

Mots-clés: Canaux fading, communications sans fil, canaux Broadband (ISI), codes Space Time, communication opportuniste, tension taux-diversité, protection d'erreurs non-égale, codes multi-level.

Contents

Abstract	i
Résumé	iii
Acknowledgements	v
Contents	vii
List of Figures	x
1 Introduction	1
1.1 Tradeoff between rate and reliability	2
1.2 Diversity Embedding	4
1.3 Thesis Outline and Contributions	6
2 Background and Notation	9
2.1 Channel Model	9
2.2 Finite alphabet versus rate growth framework	10
2.3 Coding for ISI channels	12
2.4 Code design criteria	13
2.5 Tradeoff between Rate and Diversity	13
2.5.1 Finite Alphabet Codes	14
2.5.2 Multiplexing Rate	14
2.6 Summary	15
3 Multilevel Constructions: Finite Alphabet	17
3.1 Code Design Criteria	18
3.2 Set Partitioning of QAM and QPSK Constellations	20
3.2.1 QAM Constellation	21
3.2.2 PSK Constellation	22
3.3 Algebraic properties of binary partition	23
3.4 Multilevel Construction	24
3.5 Implications of Multilevel Construction	26
3.6 Diversity Embedded Trellis Codes	28

3.7	Performance of Diversity Embedded Codes	30
3.A	Proof of Theorem 3.2	34
4	Binary Matrices for ISI Channels	39
4.1	Background and Code Construction	39
4.1.1	Code construction	40
4.2	Notation and Definition	43
4.3	Minimal Basis Vectors	45
4.3.1	First step in the construction of Minimal Basis Vectors	47
4.3.2	Second step in the construction of Minimal Basis Vectors	50
4.3.3	Existence of Minimal Basis Vectors	54
4.4	Rank Guarantees	55
4.4.1	Maximal rank distance codes	55
4.4.2	General rank distance codes	57
4.5	Binary Convolutional codes	59
4.6	Discussion and Examples	62
4.6.1	Examples	63
4.A	Proof of Lemma 4.8	65
4.B	Proof of Lemma 4.9	66
5	Information Theoretic Diversity Embedding	69
5.1	Successive Refinement	69
5.2	ISI SISO/SIMO Tradeoff	71
5.3	Structural Observation	74
5.4	ISI channels with single transmit antenna (SISO/SIMO) . . .	78
5.5	Successive refinement of MISO ISI channel	82
5.5.1	Codebook Constraints	85
5.5.2	Successive Refinement	86
5.5.3	Discussion	89
5.A	Proof of Lemmas for SISO ISI channel	89
5.A.1	Proof of Lemma 5.6	89
5.A.2	Proof of Lemma 5.7	91
5.B	Proof of Lemmas for MISO ISI channel	93
5.B.1	Proof of Lemma 5.9	93
5.B.2	Proof of Lemma 5.10	95
5.B.3	Proof of Lemma 5.11	96
5.B.4	Proof of Lemma 5.12	96
6	Applications	101
6.1	Wireless Image Transmission	102
6.1.1	Design choices	103
6.1.2	Performance	104
6.2	Rate Delay Optimization	105
6.3	Coverage Extension and Throughput Augmentation	110
6.3.1	Coverage	110

6.3.2	Regime with different constellation sizes	111
6.3.3	Throughput	111
7	Conclusion and Future Work	115
7.1	Future Work	116
	Bibliography	119
	Curriculum Vitæ	125