

**João Alfredo Cal Braz**

**Deteccção de Sinais em Sistemas Multiantena  
com Modulação Espacial**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Raimundo Sampaio Neto

Rio de Janeiro  
Novembro de 2015

**João Alfredo Cal Braz**

## **Detecção de Sinais em Sistemas Multiantena com Modulação Espacial**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Raimundo Sampaio Neto**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

**Prof. Bartolomeu Ferreira Uchoa-Filho**

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

**Prof. César Augusto Medina Sotomayor**

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia  
(Inmetro)

**Prof. Ernesto Leite Pinto**

Instituto Militar de Engenharia (IME)

**Prof. Marcello Luiz Rodrigues de Campos**

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

**Prof. Rodrigo Caiado de Lamare**

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial de Pós-graduação do Centro Técnico  
Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de Novembro de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **João Alfredo Cal Braz**

Graduou-se em Engenharia de Telecomunicações e obteve o título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Atualmente é Pesquisador-Tecnologista no Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro).

#### Ficha Catalográfica

Braz, João Alfredo Cal

Detecção de sinais em sistemas multiantena com modulação espacial / João Alfredo Cal Braz; orientador: Raimundo Sampaio Neto. — 2015.

v., 139 f: il. (color.) ; 30 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Sistemas MIMO. 3. Modulação Espacial. 4. Detecção de sinais. 5. Codificação espaço-temporal. I. Sampaio Neto, Raimundo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

A Deus, por sempre iluminar meu caminho.  
A minha família, presente em todas as minhas conquistas.

## Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Raimundo Sampaio Neto, por todo o suporte oferecido ao longo destes anos. Um ótimo professor e orientador, cujos ensinamentos foram primordiais para a preparação desta Tese.

Aos demais professores do Cetuc, pelas aulas que muito contribuíram para minha formação acadêmica.

Ao meu chefe Rodolfo Saboia, pelo apoio a minha especialização acadêmica, possibilitando que eu tivesse a dedicação necessária para alcançar este objetivo.

Aos amigos Rodrigo David, pelos tantos debates que tivemos sobre temas acerca dos nossos estudos, de onde germinaram várias boas ideias, e Pedro Castellanos, sempre com palavras de apoio e experiência.

A minha mãe, Dolores, meu modelo de caráter e bondade, ensinou-me que sendo esforçado e correto posso alcançar o que almejo. À Rejane, minha esposa, com todo seu apoio e entendimento, em quem me espelho para atingir meus objetivos.

## Resumo

Braz, João Alfredo Cal; Sampaio Neto, Raimundo. **Detecção de Sinais em Sistemas Multiantena com Modulação Espacial**. Rio de Janeiro, 2015. 139p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Modulação Espacial é um método de transmissão por múltiplas antenas recentemente proposto, designado por MIMO-SM, que associa informação à escolha das antenas transmissoras. Isto possibilita a redução do número de cadeias de radiofrequência e, conseqüentemente, a implementação de sistemas de comunicação que consomem menos energia. O novo esquema de comunicação dos sistemas MIMO-SM exige que, do lado receptor, novas e eficientes estratégias de detecção do sinal transmitido sejam elaboradas. O detector de máxima verossimilhança (ML), que fornece o desempenho ótimo, é de inviável implementação devido ao elevado custo computacional. Os detectores *Sphere Decoding* (SD) são comumente aplicados aos sistemas MIMO e atingem o desempenho ótimo a menor custo de computação. Um algoritmo SD que considera as características do sinal SM foi desenvolvido, resultando em redução de custo computacional em relação ao detector ML e aos algoritmos SD convencionais. A elevada sensibilidade da complexidade dos algoritmos SD à variação da relação sinal-ruído (SNR) motivou o desenvolvimento de técnicas de detecção subótimas. Estratégias baseadas em detecção em grupos foram propostas, e os algoritmos de detecção aninhada MLA-M e MLA-C tiveram sua complexidade e desempenho avaliados em diferentes configurações e cenários de canal. Uma nova família de detectores, que realiza a detecção da combinação de antenas transmissoras e dos símbolos transmitidos em fases distintas, foi proposto, e o algoritmo List-BMP-LR-MMSE atingiu desempenho de detecção quase ótimo com baixo custo computacional, menos sensível à variação de SNR. Baseado na estratégia de detecção em duas fases, um novo detector de baixo custo foi desenvolvido para sistemas SM com codificação espaço-temporal.

## Palavras-chave

Sistemas MIMO; Modulação Espacial; Detecção de sinais; Codificação espaço-temporal.

## Abstract

Braz, João Alfredo Cal; Sampaio Neto, Raimundo (Advisor). **Signal Detection in Spatial Modulation Multiantenna Systems**. Rio de Janeiro, 2015. 139p. PhD Thesis — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Spatial Modulation is a recently proposed multiantenna transmission scheme, designated as SM-MIMO, that associates information to the transmit antenna selection, thus enabling the reduction of the number of radiofrequency chains and, consequently, the implementation of less power consuming communication systems. The novel SM-MIMO communication scheme requires, at the receiver side, the development of new and efficient signal detection strategies of the transmitted signal. The maximum likelihood (ML) detector, that achieves the optimal performance, is infeasible to implement due to the high computational cost. Sphere Decoding detectors (SD) are customarily applied to MIMO systems and attain optimal performance with lower computational cost. An SD algorithm, tailored following SM signal characteristics was developed, resulting in computational cost reduction compared to ML detector and conventional MIMO SD algorithms. The high computational sensitivity of SD algorithms to the signal-to-noise ratio (SNR) variation motivated the development of suboptimal detection techniques. Strategies based in group detection were proposed, and nested detection algorithms MLA-M and MLA-C had their complexity and performance evaluated in different configurations and channel scenarios. A new family of detectors, that performs the detection of the transmit antenna combinations and the transmitted symbols in two distinct stages, was proposed, and List-BMP-LR-MMSE algorithm attained near-optimal detection performance with low computational complexity, less sensitive to SNR variation. Based on the two-stage detection strategy, a new low-complexity detector was developed to space-time coded SM systems.

## Keywords

MIMO systems; Spatial Modulation; Signal detection; Space-time coding.

# Sumário

1	Introdução	14
1.1	Organização da Tese	17
2	Transmissão em canais MIMO	20
2.1	Modelo de transmissão	20
2.2	Sistemas MIMO com Modulação Espacial Generalizada (MIMO-GSM)	24
2.3	Erros de estimativa do canal MIMO	29
3	Detecção ótima GSM	31
3.1	Detecção ML	31
3.2	Limitante superior para a probabilidade de erro de detecção do detector ótimo GSM	32
3.3	Critério para escolha das combinações de antenas transmissoras	39
3.4	Algoritmo Sphere Decoding (SD)	44
3.5	Desenvolvimento de algoritmo SD para sistemas GSM	47
4	Detecção subótima GSM – Detectores integrados	55
4.1	Detector ML em Grupos (MLG)	55
4.2	Detector ML Aninhado (MLA)	58
4.3	Resultados numéricos: desempenho de detecção	62
4.4	Resultados numéricos: complexidade computacional	64
4.5	Seleção das partições das antenas transmissoras com informação de <i>feedback</i> limitada	65
5	Detecção subótima GSM – Detectores em duas fases	70
5.1	Fase 1: Detecção da combinação de antenas transmissoras	70
5.2	Fase 2: Detecção dos símbolos APSK	76
5.3	Detector aprimorado baseado em lista de comprimento variável (List-BMP-MMSE-LR)	80
5.4	Resultados numéricos: desempenho de detecção	83
5.5	Resultados numéricos: complexidade computacional	85
5.6	Considerações a respeito das estratégias propostas na Tese	87
6	Detecção em sistemas GSM com codificação espaço-temporal	90
6.1	Codificação espaço-temporal em sistemas MIMO convencionais	90
6.2	Modulação Espacial com código OSTBC	93
6.3	Estratégias de detecção GSM-OSTBC	96
6.4	Resultados numéricos: desempenho de detecção e complexidade computacional	103
7	Conclusão	107
A	Eficiência do estimador linear MMSE	119
B	Estatísticas da variável aleatória $c$ em (3-10)	124

C	Expansão do binômio múltiplo em (3-31)	126
D	Expressão alternativa da distância Euclidiana em (3-39)	127
E	Expressão da probabilidade <i>a posteriori</i> em (4-21)	128
F	Desenvolvimento do banco de matrizes projetoras pelo método recursivo	130
G	Interpretação algébrica para o ganho de codificação baseado no ângulo entre subespaços vetoriais	133
H	Expressões dos equalizadores lineares ZF e MMSE em receptores que empregam redução de reticulado (LR)	136
I	Equivalência entre as estratégias de ordenamento usando banco de matrizes projetoras e banco de filtros casados para a detecção GSM-OSTBC	138

## Lista de Símbolos

$\propto$	proporcionalidade
$\approx$	aproximação
$x$	escalar
$\mathbf{x}$	vetor
$\mathbf{X}$	matriz
$\text{Re}(x)$	parte real do complexo $x$
$\text{Im}(x)$	parte imaginária do complexo $x$
$x^*$	complexo conjugado de $x$
$\mathbf{X}^T$	transposição de $\mathbf{X}$
$\mathbf{X}^H$	transposto conjugado (ou Hermitiana) de $\mathbf{X}$
$\mathbf{X}^\dagger$	pseudo-inversão de $\mathbf{X}$
$\ \mathbf{x}\ $	norma Euclidiana de $\mathbf{x}$
$\ \mathbf{X}\ _F$	norma de Frobenius de $\mathbf{X}$
$ \mathbf{X} $	determinante de $\mathbf{X}$
$\text{vec}(\mathbf{X})$	operação de empilhamento das colunas de $\mathbf{X}$
$\text{rank}(\mathbf{X})$	posto algébrico de $\mathbf{X}$
$\mathbf{I}_m$	matriz identidade de dimensão $m \times m$
$\mathbf{X} \otimes \mathbf{Y}$	produto de Kronecker entre $\mathbf{X}$ e $\mathbf{Y}$
$\mathcal{D}(\mathbf{x})$	discretização dos elementos de $\mathbf{x}$ para símbolos da modulação digital empregada
$\{x_i\}_{i=1}^N$	conjunto formado por elementos $x_i$ , numerados de 1 a $N$
$\text{card}(\mathcal{S})$	cardinalidade do conjunto $\mathcal{S}$
$\text{sort}(\mathcal{S})$	ordenamento decrescente dos elementos de $\mathcal{S}$
$P(\mathfrak{A})$	probabilidade de ocorrência do evento $\mathfrak{A}$
$p_X(x)$	função densidade de probabilidade da variável aleatória $x$
$\mathbb{E}[x]$	valor esperado de $x$

$Q$	complemento da função densidade cumulativa da distribuição normal padrão
$\lfloor x \rfloor$	escalar inteiro imediatamente inferior ao escalar real $x$
$\lfloor x \rfloor_{2^p}$	potência de dois imediatamente inferior ao escalar real $x$
$\lceil x \rceil$	escalar inteiro mais próximo ao escalar real $x$
$\binom{x}{y}$	coeficiente binomial; número de combinações sem reposição de $y$ elementos dentre $x$ opções
$\langle a \ b \rangle$	concatenação das $t$ -uplas $a$ e $b$

## Lista de Siglas

APSK	chaveamento por comutação de amplitude e fase ( <i>amplitude phase shift keying</i> )
BFC	banco de filtros casados
BMP	banco de matrizes projetoras
CD	ordenamento por confiabilidade da detecção
FLOP	operação de ponto flutuante ( <i>floating point operation</i> )
LR	redução de reticulado ( <i>lattice reduction</i> )
MIMO	múltipla entrada, múltipla saída ( <i>multiple-input, multiple-output</i> )
ML	máxima verossimilhança ( <i>maximum likelihood</i> )
MLA	detector de máxima verossimilhança aninhado
MDC	ordenamento por mínima distância da constelação
MLG	detector de máxima verossimilhança em grupos
MMSE	mínimo erro médio quadrático ( <i>minimum mean square error</i> )
GSM	modulação espacial generalizada ( <i>generalized spatial modulation</i> )
OB-MMSE	detector <i>ordered-block minimum mean square error detector</i>
OFDM	multiplexação por divisão de frequência ortogonal ( <i>orthogonal frequency division multiplexing</i> )
OSTBC	codificação em blocos espaço-temporal ortogonal ( <i>orthogonal space-time block coding</i> )
QAM	modulação por amplitude em quadratura ( <i>quadrature amplitude modulation</i> )
QPSK	chaveamento por comutação de fase em quadratura ( <i>quadrature phase shift keying</i> )
SD	decodificação em esfera ( <i>sphere decoding</i> )
SD-DI-RC	detector <i>sphere decoding</i> com distância incremental e restrição de caminhos
SM	modulação espacial ( <i>spatial modulation</i> )
SMX	multiplexação espacial ( <i>spatial multiplexing</i> )

SNR	razão sinal-ruído ( <i>signal-to-noise ratio</i> )
TEB	taxa de erro de bit
ZF	equalizador <i>zero-forcing</i>