

Técnicas de Processamento de Sinais e Telecomunicações

**Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)**

Henrique Ajuz Holzmann

(Organizador)

Técnicas de Processamento de Sinais e Telecomunicações

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Executiva: Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Karine de Lima
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^a Dr^a Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof^a Dr^a Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof^a Dr^a Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof.^a Dr.^a Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
T255	Técnicas de processamento de sinais e telecomunicações [recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-449-8 DOI 10.22533/at.ed.498190807 1. Tecnologia da informação. 2. Telecomunicações. I. Holzmann, Henrique Ajuz. CDD 338.47
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra Técnicas de Processamento de Sinais e Telecomunicações está organizada de maneira a atender a temas atuais sobre a área de telecom e processamento de sinais de maneira sucinta e otimizada, sendo dividido em 17 capítulos sequenciais.

A transmissão de dados juntamente com suas vertentes representa um dos principais pilares para o progresso econômico de uma nação e para o atendimento de inúmeras necessidades da humanidade, estando presente nos mais diversos setores. Desenvolve-la de maneira eficiente é uma busca constante de grandes empresas e pesquisadores, buscando otimizar e agilizar o processo de troca de informações.

Produzir conhecimento nestas áreas é de extrema importância, a fim de gerar desenvolvimento e ampliar possibilidades nos mais diversos campos. Desta forma um compendio de temas e abordagens que facilitam as relações entre temas referentes a comunicação e processamento de sinais em diferentes níveis de profundidade em pesquisas, envolvendo aspectos técnicos, científicos e humanos é trazido nesta obra.

Boa leitura!

Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANTENA DE MICROFITA RETANGULAR PARA APLICAÇÃO EM 2,5 GHZ UTILIZANDO SUBSTRATO METAMATERIAL	
Almir Souza e Silva Neto Bruno Pontes Alves da Silva Matheus Mesquita Correa Humberto César Chaves Fernandes Ronilson Mendes Fonseca	
DOI 10.22533/at.ed.4981908071	
CAPÍTULO 2	7
BANDWIDTH ENHANCEMENT OF AN ULTRA WIDE BAND PLANAR INVERTED F-ANTENNA	
Pedro Paulo Ferreira do Nascimento Glauco Fontgalland Raymundo de Amorim Júnior Tagleorge Marques Silveira Rodrigo César Fonseca da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.4981908072	
CAPÍTULO 3	14
COMPORTAMENTO DE MODELOS DE DIFRAÇÃO SOBRE MÚLTIPLOS GUMES DE FACA EM VHF E UHF	
Lorenço Santos Vasconcelos Gilberto Arantes Carrijo	
DOI 10.22533/at.ed.4981908073	
CAPÍTULO 4	27
ON-CHIP KOCH FRACTAL ANTENNA ARRAY FOR 60 GHZ ISM BAND APPLICATION	
Paulo Fernandes da Silva Júnior Ewaldo Eder Carvalho Santana Mauro Sérgio Pinto Filho Almir Souza e Silva Neto Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira Paulo Henrique da Fonseca Silva Alexandre Jean René Serres Raimundo Carlos Silvério Freire	
DOI 10.22533/at.ed.4981908074	
CAPÍTULO 5	36
PROJETO E ANÁLISE DE UM ARRANJO LINEAR DE ANTENAS UTILIZANDO A CURVA FRACTAL DE KOCH	
Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira Pedro Carlos de Assis Júnior Marcelo da Silva Vieira Rodrigo César Fonseca da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.4981908075	

CAPÍTULO 6	48
FINDING REPEATER PLACEMENT FOR P2P WIRELESS LINKS WITH NLOS IN EXTREMELY MOUNTAINOUS REGIONS	
Alvaro Javier Ortega	
DOI 10.22533/at.ed.4981908076	
CAPÍTULO 7	60
NOVA ARQUITETURA DE DEMODULADOR $\pi/3$ -BPSK PARA OS SATÉLITES DO SISTEMA BRASILEIRO DE COLETA DE DADOS	
Flavia Vasconcelos Maia	
Antonio Macilio Pereira de Lucena	
Francisco de Assis Tavares Ferreira da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.4981908077	
CAPÍTULO 8	73
PROPOSTA DE UM NOVO ALGORITMO QOS-AWARE PARA O ESCALONAMENTO <i>DOWNLINK</i> LTE-A EM CENÁRIOS DE TRÁFEGO MISTO: UMA COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO	
Júnio Moreira	
Éderson Rosa da Silva	
Paulo Roberto Guardieiro	
DOI 10.22533/at.ed.4981908078	
CAPÍTULO 9	85
SERVIÇO DE L2VPN EM REDES DE <i>BACKBONE</i> IP: ESTUDO DE CASO DA REDECOMEP-RIO	
Pedro Henrique Diniz da Silva	
Natália Castro Fernandes	
Nilton Alves Jr.	
Márcio Portes de Albuquerque	
DOI 10.22533/at.ed.4981908079	
CAPÍTULO 10	101
SISTEMA DISTRIBUÍDO PARA DETECÇÃO DE AMEAÇAS EM REDES UTILIZANDO <i>DEEP LEARNING</i>	
Fábio César Schuartz	
Mauro Sérgio Pereira Fonseca	
Anelise Munaretto	
DOI 10.22533/at.ed.49819080710	
CAPÍTULO 11	113
UM MÓDULO DE DEFESA PARA ATAQUES DDOS NA CAMADA DE APLICAÇÃO USANDO ESTRATÉGIAS SELETIVAS	
Túlio Albuquerque Pascoal	
João Henrique Gonçalves Corrêa	
Vivek Nigam	
Iguatemi Eduardo da Fonseca	
DOI 10.22533/at.ed.49819080711	

CAPÍTULO 12	125
AN EMPIRICAL RATE BALANCED ALIEN XTALK MITIGATION METHOD FOR G.FAST SYSTEMS	
Diego de Azevedo Gomes	
Cláudio de Castro Coutinho Filho	
João Victor Costa Carmona	
Evaldo Gonçalves Pelaes	
DOI 10.22533/at.ed.49819080712	
CAPÍTULO 13	135
REPRESENTAÇÃO ESPARSA UTILIZANDO WAVELETS E VARIAÇÃO TOTAL APLICADOS AO PROCESSAMENTO DE SINAIS DE DESCARGAS PARCIAIS	
Paulo Vitor do Carmo Batista	
Hilton de Oliveira Mota	
DOI 10.22533/at.ed.49819080713	
CAPÍTULO 14	152
REDUÇÃO DE DIMENSÕES USANDO TRANSFORMADA DE KARHUNEN-LOÈVE EM SISTEMAS MIMO MASSIVO DISTRIBUÍDO COM <i>FRONTHAUL</i> LIMITADO	
Ricardo de Souza Cerqueira	
André Noll Barreto	
DOI 10.22533/at.ed.49819080714	
CAPÍTULO 15	167
WSN COVERAGE IMPROVEMENT WITH ROF IN BUS TOPOLOGY FOR SMART CITIES	
Raphael Montali da Assumpção	
Indayara Bertoldi Martins	
Frank Herman Behrens	
Omar Carvalho Branquinho	
Fabiano Fruett	
DOI 10.22533/at.ed.49819080715	
CAPÍTULO 16	179
MODELO ELETROMAGNÉTICO DE UM ARRANJO PLANAR DE NANODIPOLOS SOBRE PLANO DE OURO ATRAVÉS DA FUNÇÃO DE GREEN 3D	
André Felipe Souza da Cruz	
Nadson Welkson Pereira de Souza	
Karlo Queiroz da Costa	
DOI 10.22533/at.ed.49819080716	
CAPÍTULO 17	194
AVALIAÇÃO DE FADIGA MUSCULAR LOCALIZADA EM SINAIS ELETROMIOGRÁFICOS UTILIZANDO TAXA DE AMOSTRAGEM VARIÁVEL NO TEMPO	
Jean Kevyn Correia Pessoa	
Pedro Henrique Melgaço de Oliveira Martins	
Thiago Raposo Milhomem de Carvalho	
DOI 10.22533/at.ed.49819080717	
SOBRE O ORGANIZADOR	207

REDUÇÃO DE DIMENSÕES USANDO TRANSFORMADA DE KARHUNEN–LOÈVE EM SISTEMAS MIMO MASSIVO DISTRIBUÍDO COM FRONTHAUL LIMITADO

Ricardo de Souza Cerqueira

Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade de Brasília
Brasília–DF

André Noll Barreto

Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade de Brasília
Brasília–DF

RESUMO: MIMO massivo distribuído é amplamente considerado como uma das principais tecnologias para sistemas de comunicação sem fio 5G. No entanto, um dos aspectos limitantes desta técnica é a capacidade dos enlaces de *fronthaul*, que transmitem a informação de cada arranjo de antenas a uma unidade de processamento centralizado. Este artigo propõe o uso da transformada Karhunen–Loève para reduzir o número de dimensões do sinal recebido no *uplink* com múltiplas antenas, e assim, reduzir os requisitos de taxa de dados do *fronthaul* com pequena perda no desempenho da transmissão.

PALAVRAS-CHAVE: Transformada de Karhunen–Loève, KLT, MIMO massivo distribuído, *fronthaul* limitado.

ABSTRACT: Distributed Massive MIMO is widely regarded as one of the key technologies

for 5G wireless communications systems. However, one of the limiting aspects of this technique is the capacity of the fronthaul links that convey the information from each individual antenna array to a centralized processing unit. In this paper, we propose the use of the Karhunen–Loève transform to reduce the number of dimensions of the received multi-antenna uplink signal, and, thus, reduce the fronthaul data-rate requirements, with little loss in the performance. **KEYWORDS:** Karhunen–Loève Transform, KLT, Distributed Massive MIMO, Limited Fronthaul.

1 | INTRODUÇÃO

Dentre as várias tecnologias atualmente consideradas para redes 5G, o *massive multiple-input multiple-output* (MIMO), ou MIMO massivo, é amplamente considerado como um dos mais promissores, permitindo aumentos substanciais de alcance e de taxa de dados (BOCCARDI *et al.*, 2014).

Sistemas *massive* MIMO são arranjos com grande número de antenas que têm, pelo menos, várias dezenas ou centenas de antenas. Estas antenas podem também ser distribuídas em diferentes painéis em locais diferentes, chamados de *remote radio heads* (RRH), com cada painel ligado a uma unidade central de processamento, ou *base band unit*

(BBU) através de um enlace de *fronthaul*, que pode ser implementado tanto com fibras ópticas, como com enlaces sem fio, seja por radiofrequência (RF) ou *free-space optics* (FSO), conforme ilustrado na Figura 1.

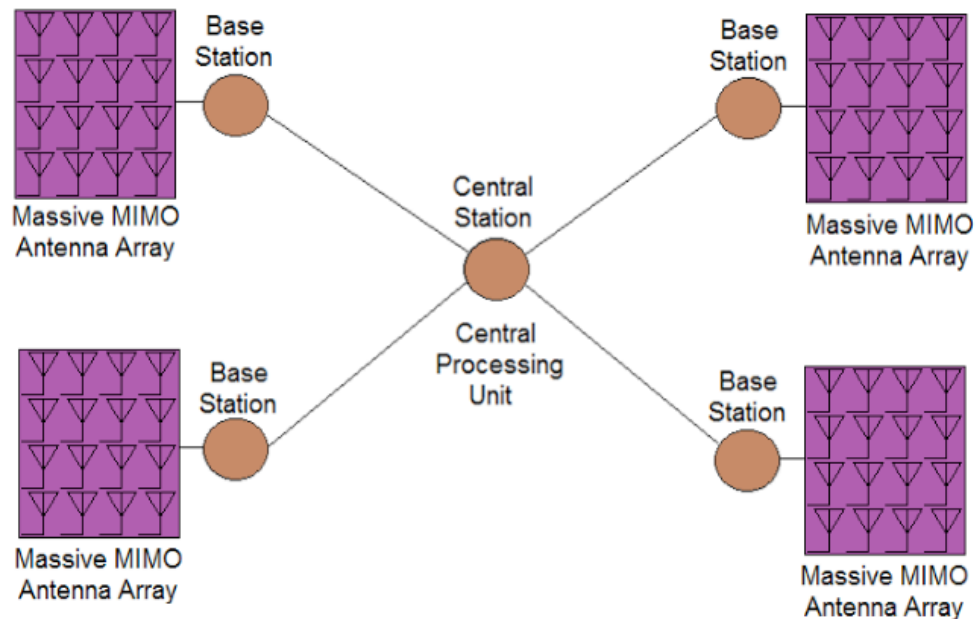


Figura 1: Topologia de um sistema MIMO massivo distribuído.

Tais sistemas são conhecidos como sistemas de antenas distribuídas (*Distributed Antenna Systems – DAS*) (BOCCARDI *et al.*, 2014), (ANDREWS *et al.*, 2014), e proporcionam não só multiplexação espacial e micro-diversidade, mas também ganhos de macro-diversidade, já que as respostas de canal de diferentes antenas têm diferentes fatores de somreamento e são tipicamente descorrelacionadas.

No entanto, a maioria dos artigos sobre MIMO distribuído considera um *fronthaul* ideal, sem limitações de capacidade (WANG *et al.*, 2013), mas o *fronthaul* com limitações é um problema fundamental nas redes sem fio futuras (MARSCH; FETTWEIS, 2007), particularmente se o número de antenas em cada painel for grande.

Nós investigamos o *uplink* de um DAS para um usuário MIMO, em que um equipamento de usuário (*user equipment – UE*), transmite feixes espaciais para um conjunto de painéis de antenas, que por sua vez são conectados a uma unidade central de processamento por enlaces *fronthaul*. Devido às limitações de capacidade, esses enlaces podem não ser capazes de transmitir todas as informações de cada antena para a unidade de processamento, e esta informação deve ser comprimida em cada painel antes de ser enviada. Neste contexto, alguns autores propuseram diferentes técnicas de compressão, por exemplo, o uso da compressão distribuída com perdas Wyner–Ziv (DEL COSO; SIMOENS, 2009), (ZHOU; YU, 2014) para lidar com o *fronthaul* com restrições de capacidade.

Nesta contribuição, propomos a utilização de uma técnica linear, a transformada Karhunen–Loève (KLT), que realiza uma fatorização da matriz para reduzir a quantidade

de informação a ser transmitida nos enlaces de *fronthaul*. A KLT baseia-se na matriz de covariância da antena de longo prazo, na qual separa o sinal em componentes descorrelacionados.

O uso da KLT em sistemas de múltiplas antenas foi sugerido em (JELITTO; FETTWEIS, 2002), na qual propõe que alguns dos componentes de maior energia sejam selecionados após a KLT para redução de dimensões do sinal. Na literatura, a KLT também foi empregada em um sistema MIMO (SIM *et al.*, 2014), mas para reduzir a informação de estado de canal (*channel state information* – CSI), no canal de retorno e não nos dados em si.

Sugerimos a extensão do proposto em (JELITTO; FETTWEIS, 2002) a um sistema com antenas distribuídas, em que uma KLT é realizada em cada arranjo e somente os componentes de maior potência são enviados ao nó central, pois consideramos uma restrição na capacidade do enlace do *fronthaul*. Isto é semelhante à KLT distribuída proposto em (GASTPAR; DRAGOTTI; VETTERLI, 2006), mas que foi aplicada a outras tarefas de processamento de sinal.

2 | MODELO DO SISTEMA

Neste trabalho consideramos o *uplink* de um sistema sem fio em um cenário de propagação urbano com multipercursos na qual os UEs transmitem por meio de painéis com grande número de antenas. Consideramos um cenário de usuário único, em que o UE está localizado no ponto médio entre dois painéis de antenas, distante 100 m de cada painel. Também foi considerado que cada UE possui 4 antenas de transmissão, e que cada painel de antenas tem 25 antenas de recepção, em um arranjo linear de antenas. Estas configurações podem ser facilmente modificadas para outros cenários com diferentes números de painéis de antenas e usuários, ou para outros modelos de propagação, distâncias, configurações de antena e formatos de painel.

Conforme mostrado na Figura 2 cada painel realiza uma compressão com perdas no sinal multidimensional recebido e transmite esta informação reduzida a um servidor central, que tenta detectar o sinal transmitido baseado na combinação da informação, com perdas, de todos os painéis.

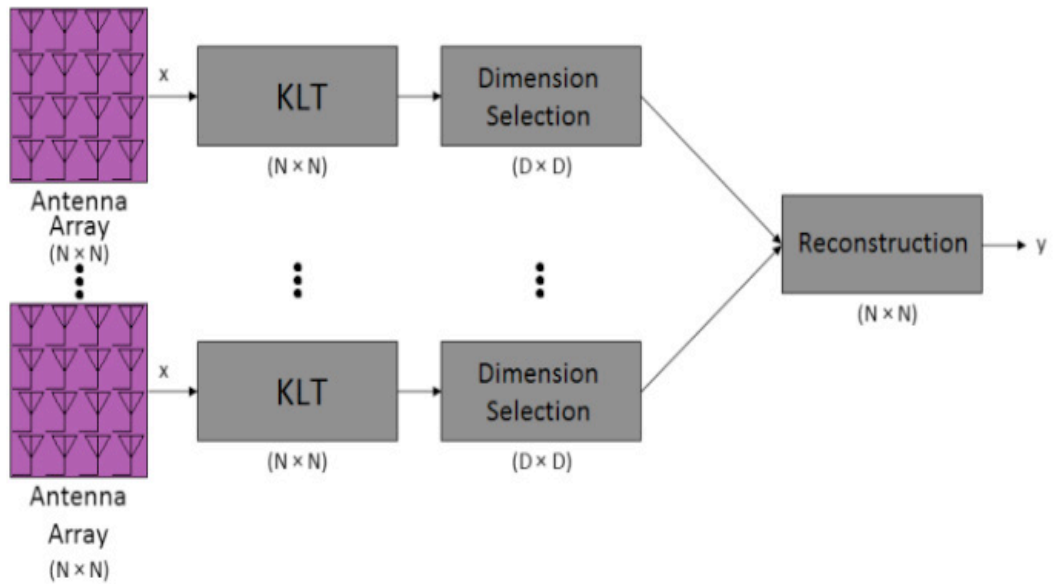


Figura 2: Redução de dimensões no *massive* MIMO distribuído.

Como as simulações são relacionadas com o desempenho na camada de enlace, o modelo de perda por percurso não é crítico, e foram consideradas somente as perdas de percurso por espaço livre (*free-space path loss* – FSPL), baseada na fórmula de Friis (FRIIS, 1946)

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (1)$$

Onde d é a distância entre o transmissor e o receptor, e λ é o comprimento de onda. Foi considerada a frequência portadora de 60 GHz.

A cada intervalo de símbolo foi considerada a transmissão de um vetor \mathbf{x} , que consiste em M diferentes símbolos QAM/PSK, mapeados em M diferentes antenas de transmissão e feixes espaciais.

No lado do receptor, tem-se k sinais recebidos, um para cada um dos K painéis de antenas, que são definidos como:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x} + \mathbf{n}_k \quad (2)$$

Onde \mathbf{y}_k é o vetor do sinal recebido pelo painel k , \mathbf{H}_k é a matriz de canal com dimensões $N \times M$, sendo N o número de antenas de recepção em cada painel, M o número de antenas de transmissão, \mathbf{x} é o vetor do sinal transmitido, e \mathbf{n}_k é o vetor de ruído gaussiano branco aditivo (AWGN).

Os sinais dos K painéis são enviados ao servidor central, onde os sinais recebidos por cada painel são concatenados em um vetor global:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{y}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{k-1} \end{bmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_0 \\ \mathbf{H}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_{k-1} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_0 \\ \mathbf{n}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{n}_{k-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Foi considerado inicialmente um cenário sem linha de visada (*non-line-of-sight* – NLOS), em que a matriz do canal é modelada como variáveis aleatórias de desvanecimento Rayleigh. Também consideramos que as matrizes de canal em diferentes painéis de antenas são descorrelacionadas. Porém, especialmente considerando o grande número de antenas em um painel de tamanho limitado, é muito provável que o sinal em diferentes elementos de antena sejam correlacionados.

Em cenários NLOS típicos e para tamanhos de matriz moderados, a matriz de covariância do canal \mathbf{R}_H pode ser bem aproximada pelo produto de Kronecker das matrizes de covariância no lado do transmissor e do receptor, respectivamente (YU, 2005):

$$\mathbf{R}_H = \mathbf{R}_{Tx} \otimes \mathbf{R}_{Rx} \quad (4)$$

Onde \otimes denota o produto de Kronecker, \mathbf{R}_{Tx} é a matriz de covariância do canal lado do transmissor, com dimensões $M \times M$, e \mathbf{R}_{Rx} é a matriz de covariância do canal do lado receptor, com dimensões $N \times N$.

Considerando as matrizes de correlação de antena dadas, a correlação de antena da equação (4) pode ser modelada na matriz de canal de cada painel, fazendo (YU *et al.*, 2002):

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{R}_{Rx}^{1/2} \mathbf{H}_{wk} \left(\mathbf{R}_{Tx}^{1/2} \right)^T \quad (5)$$

Onde \mathbf{H}_{wk} é uma matriz de canal com elementos independentes de desvanecimento Rayleigh, com dimensões $N \times M$, e $(\cdot)^T$ é a matriz transposta.

2.1 MATRIZ DE COVARIÂNCIA DA ANTENA

Considerando que as antenas vizinhas provavelmente têm uma grande correlação, tanto as matrizes de covariância da antena de recepção e de transmissão, \mathbf{R}_{Rx} e \mathbf{R}_{Tx} , foram implementadas fazendo-se $R_{ij} = \alpha^{|i-j|}$, onde i e j são os índices da linha e da coluna, respectivamente, e conseqüentemente, $|i-j|$ representa a distância da antena, ou seja, a correlação da antena diminui com a distância.

Esta abordagem também foi feita em (GASTPAR; DRAGOTTI; VETTERLI, 2006), resultando na seguinte matriz covariância circulante de recepção:

$$\mathbf{R}_{\text{Rx}} = \begin{bmatrix} \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^2 & \dots & \alpha^{N-1} \\ \alpha^1 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^2 & \vdots \\ \alpha^2 & \alpha^1 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^2 \\ \vdots & \alpha^2 & \alpha^1 & \ddots & \alpha^1 \\ \alpha^{N-1} & \dots & \alpha^2 & \alpha^1 & \alpha^0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

O nível de correlação depende do valor do parâmetro α . Por exemplo, temos correlação total entre os sinais recebidos quando $\alpha = 1$, e sinais completamente descorrelacionados quando $\alpha = 0$.

A matriz de correlação de transmissão \mathbf{R}_{Tx} é criada da mesma forma que do lado de recepção, porém com dimensões $M \times M$.

3 | REDUÇÃO DE DIMENSÕES

Considerando o grande número de antenas receptoras e limitações de espaço nos painéis é muito provável que os sinais recebidos sejam altamente correlacionadas entre antenas diferentes. Isto é o que permite o uso de técnicas de redução de dimensões com pouca perda de informação. Neste artigo, foi empregada a transformada Karhunen–Loève para comprimir o sinal a partir da redução do número de dimensões que contém informações relevantes, assumindo o perfeito conhecimento da matriz de covariância da antena de recepção. Como se trata de uma métrica estatística de longo prazo aplicado a um receptor fixo, pode-se considerar que esta seja uma suposição razoável.

Adotamos o termo transformada Karhunen–Loève em vez de decomposição em valores singulares (*single value decomposition* – SVD). Ambos são intercambiáveis e usados na literatura. Em (GERBRANDS, 1981) tanto a KLT e a análise de componentes principais, ou *principal component analysis* (PCA), são descritos e pode-se ver que, no cenário de desvanecimento Rayleigh considerado neste trabalho, ambas as abordagens são equivalentes já que os ganhos de canal têm uma média nula.

Após a execução da KLT é realizada uma seleção dos D componentes mais fortes, cuja quantidade de componentes selecionados depende da capacidade dos enlaces de *fronthaul*. Isto equivale a uma compressão com perdas, já que é descartada informação dos componentes mais fracos, mas, por outro lado, também é descartado o ruído contido nestes componentes (JELITTO; FETTWEIS, 2002).

Como foi considerado um sistema com painéis de antenas distribuídas, foi utilizada a KLT distribuída (GASTPAR; DRAGOTTI; VETTERLI, 2006). Ela difere da KLT pois os dados são divididos em subgrupos. A KLT é realizada em cada subconjunto individual, e, em seguida, o sinal é reconstruído em uma unidade de processamento central pela união de cada subconjunto processado. Neste trabalho, os subconjuntos representam os diferentes painéis de antenas, tal como mostrado na Figura 2.

A KLT é realizada com base na decomposição em valores singulares da matriz

de covariância, cuja saída são valores singulares em ordem decrescente de energia e seus correspondentes vetores singulares. Se a SVD for aplicada em uma matriz de covariância \mathbf{R} , os vetores singulares esquerdos e direitos serão os mesmos. No caso deste trabalho, a matriz covariância das antenas de recepção foi decomposta, tal que:

$$\mathbf{R}_{\text{Rx}} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^{\text{H}} \quad (7)$$

Onde \mathbf{U} é uma matriz unitária com dimensões $N \times N$, cujas colunas representam os vetores singulares esquerdos, $\mathbf{\Lambda}$ é uma matriz diagonal com valores singulares $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ em ordem decrescente, e $(\cdot)^{\text{H}}$ é transposta Hermitiana.

Com o conhecimento da matriz de covariância, a KLT efetua uma transformação linear do sinal de entrada, de tal modo que as saídas são descorrelacionadas. Isto é feito pela aplicação da seguinte transformação em cada painel antena:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{U}^{\text{H}} \mathbf{y}_k \quad (8)$$

Resultando em um vetor \mathbf{z}_k de N sinais descorrelacionados, com valores em ordem decrescente de potência e correspondentes aos valores singulares λ_j .

Dependendo do nível de correlação, a potência estará concentrada em alguns poucos componentes e pode-se realizar a seleção de dimensões pela remoção de alguns destes componentes que não têm contribuição relevante para a reconstrução do sinal. Enquanto o número de dimensões for maior ou igual ao número de feixes espaciais, a detecção dos sinais espacialmente multiplexados ainda será possível.

Na etapa de seleção de dimensões o tamanho do sinal é reduzido de N para D dimensões, onde $D \leq N$, conforme mostrado na Figura 2.

Para representar essa seleção de dimensões é necessário criar uma matriz de transformação de redução:

$$\mathbf{T} = [\mathbf{I}_D | \mathbf{0}_{[D \times (N-D)]]}]_{[D \times N]} \quad (9)$$

Onde \mathbf{I}_D é uma matriz identidade com dimensões $D \times D$ e $\mathbf{0}$ é uma matriz nula com dimensões $D \times (N-D)$.

A seleção de dimensões pode ser representada como:

$$\mathbf{y}_{\text{KLT},k} = \mathbf{T} \mathbf{z}_k \quad (10)$$

Esta redução de dimensões permite a diminuição da capacidade dos enlaces de *fronthaul* entre os painéis de antenas e a unidade de processamento central. Ela também ajuda a reduzir o processamento na estação central, ou *central station* (CS), porque o número de dimensões é significativamente menor do que o sinal original,

porém, ao custo da execução da KLT nos painéis de antenas.

Pela substituição da equação (8) na equação (10), temos:

$$\mathbf{y}_{\text{KLT},k} = \mathbf{T}\mathbf{U}^H\mathbf{y}_k \quad (11)$$

E, substituindo a equação (2) na equação (11), temos:

$$\mathbf{y}_{\text{KLT},k} = \mathbf{T}\mathbf{U}^H\mathbf{H}_k\mathbf{x} + \mathbf{T}\mathbf{U}^H\mathbf{n}_k = \mathbf{H}_{\text{KLT},k}\mathbf{x} + \mathbf{n}_{\text{KLT},k} \quad (12)$$

Onde $\mathbf{H}_{\text{KLT},k}$ é a matriz de canal com dimensões reduzidas pela KLT e $\mathbf{n}_{\text{KLT},k}$ é o vetor de ruído após a transformação, que, em razão de \mathbf{U} ser unitário, tem amostras de ruído com a mesma potência do vetor de ruído original \mathbf{n} .

4 | DETECÇÃO DE SINAL

Após reduzirmos as dimensões, todos os sinais com dimensões reduzidas são concatenados na unidade central de processamento, tal que, em vez da equação (3), tem-se o sinal composto que representa um canal MIMO para D antenas receptoras decorrelacionadas.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{\text{KLT}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{\text{KLT},0} \\ \mathbf{y}_{\text{KLT},1} \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{\text{KLT},k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{\text{KLT},0} \\ \mathbf{H}_{\text{KLT},1} \\ \vdots \\ \mathbf{H}_{\text{KLT},k-1} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{\text{KLT},0} \\ \mathbf{n}_{\text{KLT},1} \\ \vdots \\ \mathbf{n}_{\text{KLT},k-1} \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{H}_{\text{KLT}}\mathbf{x} + \mathbf{n}_{\text{KLT}} \end{aligned} \quad (13)$$

O sinal transmitido pode então ser detectado usando-se esquemas padrão de detecção de multiplexação espacial. Nesta contribuição foi considerada apenas a detecção linear, isto é, o sinal de transmissão pode ser estimado como:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{y}_{\text{KLT}} \quad (14)$$

Neste estudo, foi investigado o equalizador Zero Forcing (ZF), tal que:

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{ZF}} = \mathbf{H}_{\text{KLT}}^\dagger \mathbf{z}_{\text{KLT}} \quad (15)$$

Onde $\hat{\mathbf{x}}_{\text{ZF}}$ é o sinal estimado pelo método ZF e $(\cdot)^\dagger$ é a pseudo-inversa de Moore–Penrose.

Também foi considerado o método minimum mean square error (MMSE) que

pode ser calculado como:

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{MMSE}} = \left[\left(\mathbf{H}_{\text{KLT}}^{-1} \mathbf{H}_{\text{KLT}} + \frac{1}{E_s/N_0} \right)^{-1} \mathbf{H}_{\text{KLT}}^{-1} \right] \mathbf{z}_{\text{KLT}} \quad (16)$$

Onde $\hat{\mathbf{x}}_{\text{MMSE}}$ é o sinal estimado pelo método MMSE, E_s/N_0 é a razão entre a energia de símbolo e a densidade espectral da potência do ruído, e $(\cdot)^{-1}$ é a matriz inversa.

5 | RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A fim de avaliar o desempenho da redução de dimensões de sistemas MIMO distribuído foram realizadas simulações tanto sem compressão, quanto com redução de dimensões baseadas na KLT. Simulações também foram realizadas com painéis lineares de antenas e com painéis de antenas quadrados, em um arranjo 5×5, na recepção.

Nos resultados apresentados neste trabalho, foi considerado um *layout* com um UE contendo 4 antenas de transmissão, e dois painéis de antenas igualmente distantes do UE, cada um com 25 antenas receptoras. Isto representa um sistema equivalente com 4 antenas de transmissão e um total de 50 antenas de recepção.

Nas simulações foi considerado um cenário NLOS com desvanecimento Rayleigh e AWGN, multiplexação espacial e modulação BPSK, para os métodos de estimação ZF e MMSE.

Foram realizadas diversas simulações utilizando diferentes parâmetros covariância α , com valores de $\alpha = 1/4$, $\alpha = 1/2$ e $\alpha = 3/4$, tanto para painéis lineares quanto para painéis quadrados. Nas Figuras 3 a 5 são apresentados os resultados de simulações de um cenário com um UE transmissor e dois painéis lineares de antenas.

As curvas de taxa de erro de bit, ou *bit error rate* (BER), para um canal com o parâmetro covariância $\alpha = 1/4$ são mostradas na Figura 3 e, como esperado, o desempenho se deteriora quando se reduz o número de dimensões a ser transmitido pelos enlaces de *fronthaul*. No entanto, a deterioração do desempenho é aceitável, mesmo com uma redução razoavelmente grande, como no caso de 50 para 20 antenas, e que constitui em uma enorme redução comparada ao *fronthaul* sem compressão. No caso da redução de 50 para 30 dimensões, o desempenho é praticamente idêntico ao sistema sem redução.

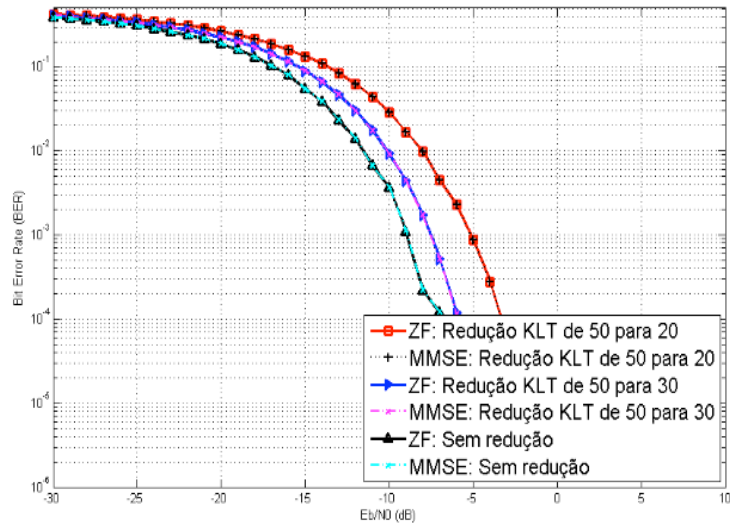


Figura 3: BER para arranjo linear com $\alpha=1/4$.

Nas Figuras 4 e 5 foram realizadas as mesmas simulações, para um arranjo linear de antenas, mas considerando um sistema com maior correlação entre as antenas, isto é, $\alpha = 1/2$ e $\alpha = 3/4$.

As simulações, conforme apresentado nas Figuras 3 a 5, comprovam que, quanto menor o fator de correlação das antenas, melhor o desempenho, pois significa que há uma maior diversidade. Também pode ser observado que, como esperado, a redução de dimensões apresenta menores perdas de desempenho quando a correlação das antenas é alta, pois neste caso, há uma maior redundância, que resulta numa compressão mais eficaz.

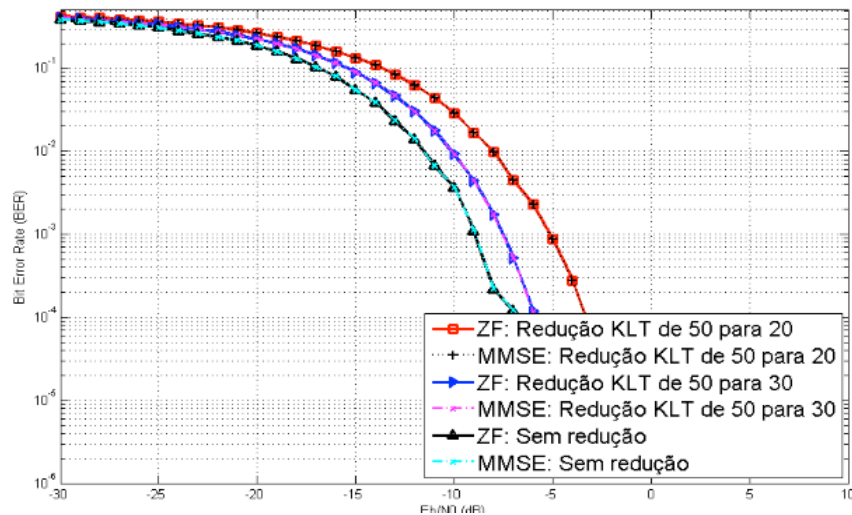


Figura 4: BER para arranjo linear com $\alpha=1/2$.

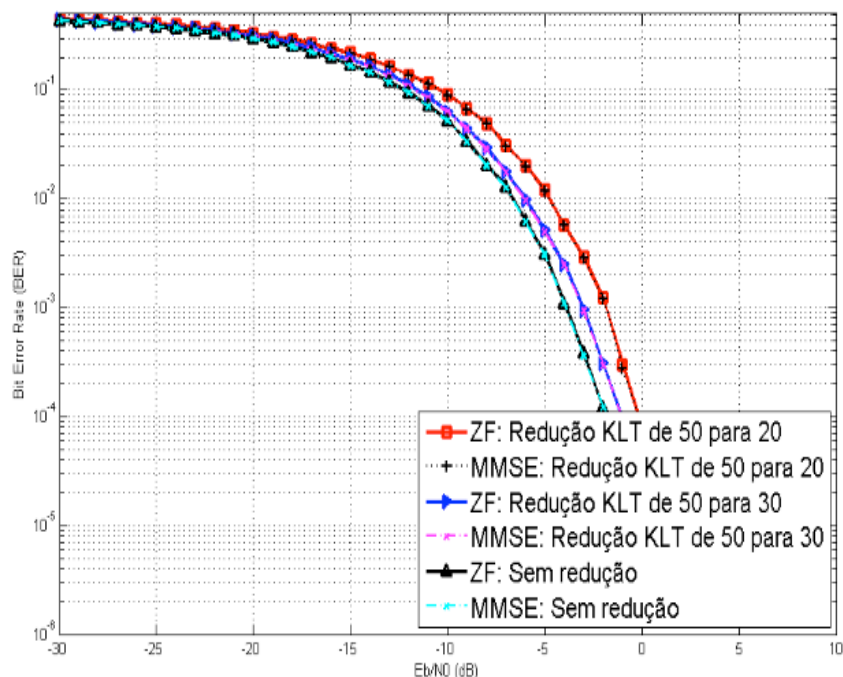


Figura 5: BER para arranjo linear com $\alpha=3/4$.

Da mesma forma que as simulações para um sistema com arranjo linear de antenas e diferentes covariâncias, as simulações para um arranjo quadrado de antenas, isto é dois painéis de 25 antenas de recepção em um arranjo 5×5 , onde a matriz de correlação é modificada, pode-se verificar que o comportamento é semelhante, porém o painel quadrado de antenas é levemente melhor que o arranjo linear, conforme mostrado nas Figuras 6 a 8.

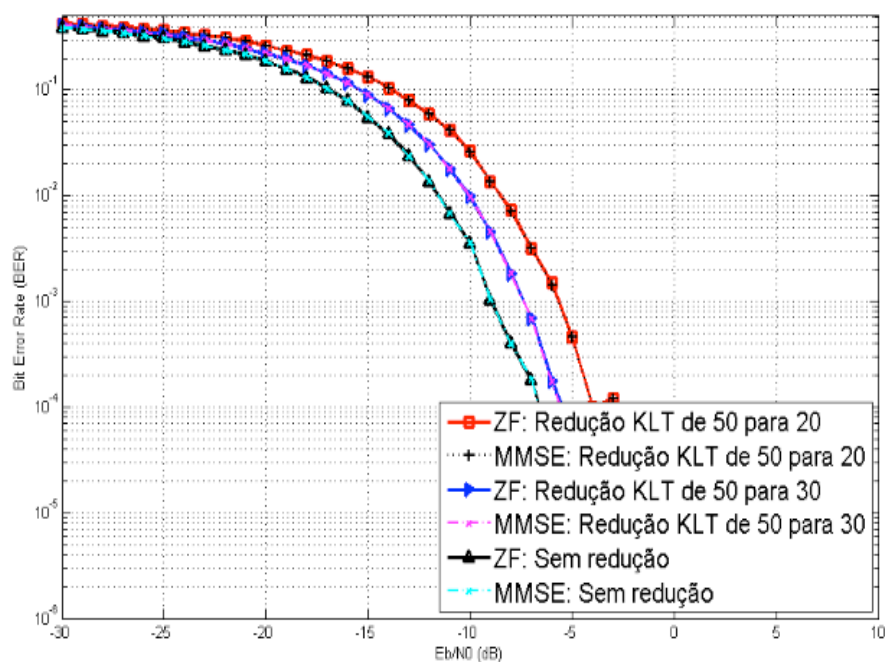


Figura 6: BER para painel quadrado com $\alpha=1/4$.

Assim como o sistema com arranjo linear, o arranjo com painel quadrado de antenas apresenta um desempenho um pouco melhor quando o fator de covariância

é menor.

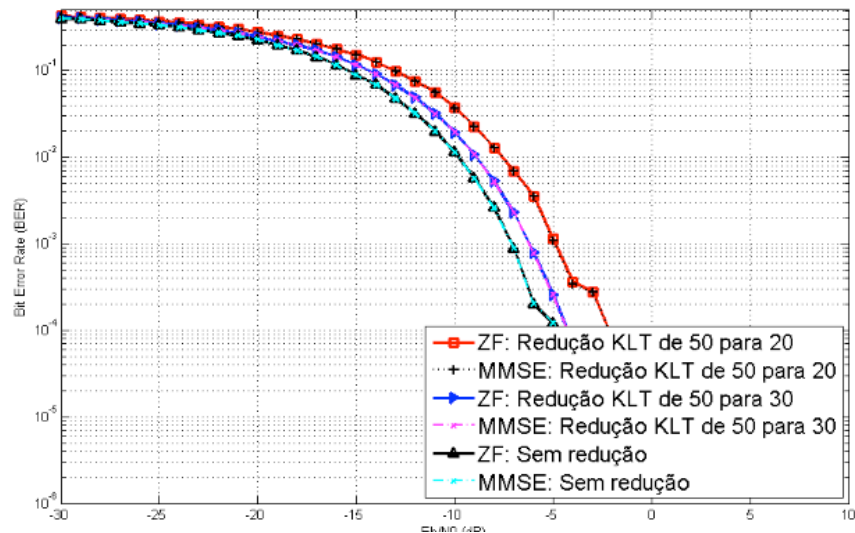


Figura 7: BER para painel quadrado com $\alpha=1/2$.

Quando a correlação das antenas é alta, assim como no arranjo linear, o desempenho do sistema é pior que um sistema com menor correlação.

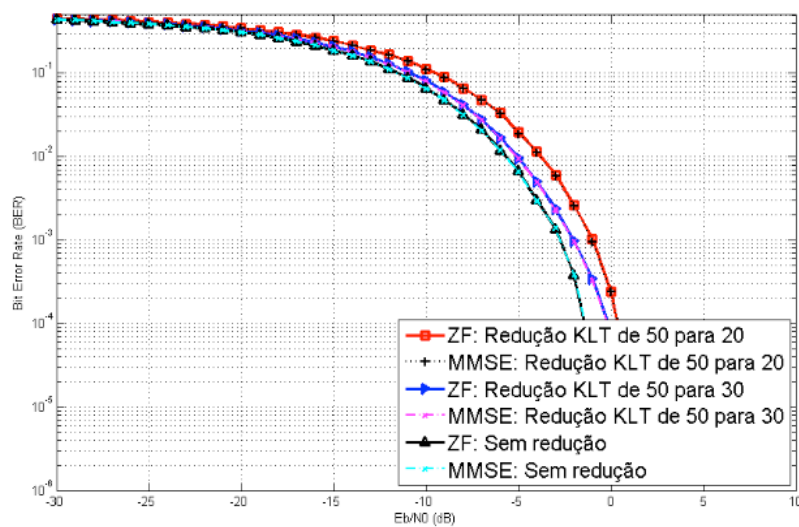


Figura 8: BER para painel quadrado com $\alpha=3/4$.

Ao se comparar três cenários com a mesma covariância (α), ou seja, sem redução, com redução de 50 para 30 dimensões e com redução de 50 para 20, pode-se verificar que o sistema de antenas distribuídas e compressão por KLT permite a obtenção de desempenho semelhante ao sistema sem compressão.

Como esperado, com mais antenas de recepção, a redução de dimensões pode selecionar os sinais mais fortes que chegam a cada painel e reduzir significativamente a quantidade de sinais requeridos, resultando na necessidade de um enlace de menor capacidade.

O número de dimensões que pode ser reduzido sem grande perda de desempenho dependerá da matriz de covariância de canal e da relação sinal-ruído, ou *signal-to-*

noise ratio (SNR), do sistema.

Na Figura 9 pode-se verificar o desempenho de cada arranjo linear com 25 antenas, pois mostra a BER para diferentes fatores de redução de dimensões para valores fixos, tanto de SNR, quanto de covariância. Neste cenário selecionado pode-se observar que o desempenho se deteriora quando se reduz o número de dimensões, e também que a partir de um número de dimensões, o desempenho é bruscamente melhorado. Este ponto é facilmente visualizado para SNRs altas e, para os cenários simulados, foi de 10 dimensões.

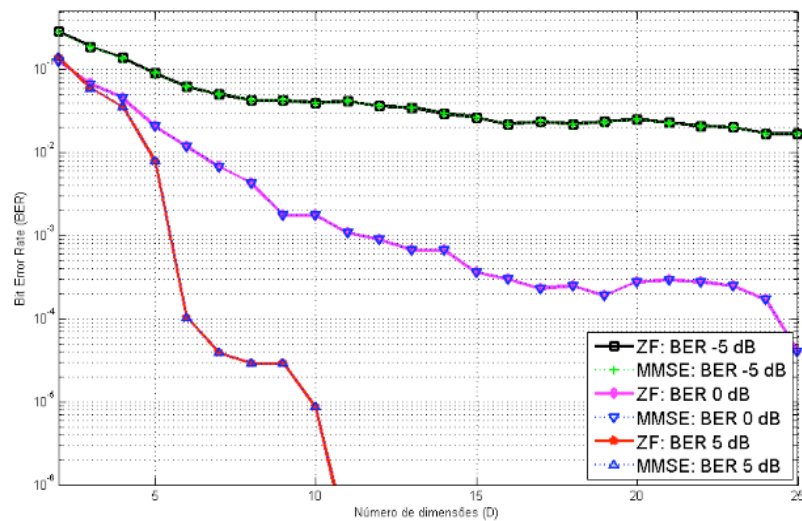


Figura 9: BER para arranjo linear de antenas com $\alpha=1/2$ e diversos fatores de redução, para E_b/N_0 fixos.

A Figura 10 apresenta o mesmo que a Figura 9, mas para um painel quadrado de antenas com arranjo 5×5 . É possível verificar que a partir de 10 dimensões, assim como no arranjo linear, o desempenho é repentinamente melhorado.

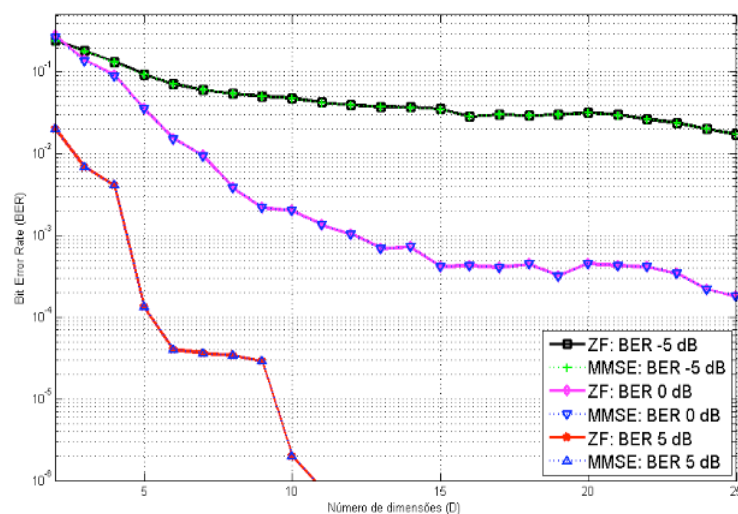


Figura 10: BER para painel de antenas com $\alpha=1/2$ e diversos fatores de redução, para E_b/N_0 fixos.

Caso se tenha um enlace de *fronthaul* com capacidade limitada, podemos

questionar se devemos simplesmente usar o número exato de antenas suportadas ou se devemos acrescentar um grande número de antenas e comprimir esse sinal. Tal situação é abordada nos resultados de simulação mostrados nas Figuras 9 e 10. Pode ser observado que a partir destes resultados uma redução de dimensões baseada na KLT permite um desempenho BER similar ao de um sistema sem compressão.

Em outras palavras, nestas simulações tem-se que a utilização da redução de dimensões baseada na KLT requer cerca de metade da taxa necessária para o mesmo enlace de *fronthaul* sem compressão.

A partir das simulações realizadas, pode-se questionar caso se tenha um enlace de *fronthaul* com restrição de capacidade, qual é o fator de redução de dimensão que se tem a melhor relação custo-benefício. Para estas simulações o fator de compressão se aproxima a metade da taxa original.

6 | CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS

Nesta contribuição verificou-se a viabilidade de um esquema de redução de dimensões em sistemas MIMO massivo distribuído por meio de uma transformação linear, a KLT, do sinal multidimensional recebido. Também foi observado que, dependendo da correlação entre as antenas, a compressão resulta em pouca perda de desempenho dos enlaces de *fronthaul*. No cenário simulado foi possível reduzir a cerca de metade da taxa original.

Esta abordagem pode ajudar na transmissão de dados relacionada a operação de *fronthaul* com limitação de capacidade, pois representa economia nas despesas operacionais das operadoras de telecomunicações.

Os resultados obtidos são promissores, mas entre diferentes questões a serem consideradas em trabalhos futuros, será necessário considerar um modelo de propagação mais realista para ondas milimétricas (mmWave) e uma matriz de antena covariância realista, de acordo com o ambiente considerado. Um modelo de propagação para linha de visada, ou *line-of-sight* (LOS), e NLOS, incluindo cenários *indoor* e *outdoor*, em mmWave e outras frequências, permitirá encontrar uma compreensão mais adequada sobre estas questões.

A estimativa da matriz de covariância também é uma questão importante a ser investigada, pois neste trabalho foi pressuposto o seu perfeito conhecimento. Será necessário executar medições e estabelecer as matrizes de covariância mais viáveis.

Este trabalho avança em uma técnica promissora que pode ter um papel fundamental no futuro da 5G, mas mais estudos e investigações ainda são necessários.

REFERÊNCIAS

ANDREWS, J. *et al.*, **What will 5G be?**, IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 32, n. 6, p. 1065-1082, Jun. 2014.

BOCCARDI, F. *et al.*, **Five disruptive technology directions for 5G**, IEEE Commun. Mag., vol. 52, p. 74-80, Fev. 2014.

DEL COSO, A.; SIMOENS, S., **Distributed compression for MIMO coordinated networks with a backhaul constraint**, IEEE Trans. on Wireless Commun., vol. 8, n. 9, p. 4698-4709, Set. 2009.

FRIIS, H. T., **A Note on a Simple Transmission Formula**, Proc. IRE, vol. 34, n. 5, p. 254-256, Maio 1946.

GASTPAR, M.; DRAGOTTI, P. L.; VETTERLI, M., **The distributed Karhunen–Loève transform**, IEEE Trans. on Inform. Theory, p. 5177-5196, Dez. 2006.

GERBRANDS, J. J., **On the relationships between SVD, KLT and PCA**, Pattern Recognition, vol. 14, n. 1-6, p. 375-381, 1981.

JELITTO, J.; FETTWEIS, G., **Reduced dimension space-time processing for multi-antenna wireless systems**, IEEE Wireless Commun., vol. 9, n. 6, p. 18-25, Dez. 2002.

MARSCH, P.; FETTWEIS, G., **A framework for optimizing the uplink performance of distributed antenna systems under a constrained backhaul**, Proc. IEEE Int. Conf. on Commun., p. 975-979, Jun. 2007.

SIM, M. S. *et al.*, **Compressed channel feedback for correlated massive MIMO systems**, IEEE Globecom Workshops, p. 327-332, Dez. 2014.

WANG, D. *et al.*, **Spectral Efficiency of Distributed MIMO Systems**, IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 31, n. 10, p. 2112-2127, Out. 2013.

YU, K., **Multiple-input multiple-output radio propagation channels characteristics and models**, Ph.D. dissertation, Dept. of signals, sensors and systems, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2005.

YU, K. *et al.*, **A wideband statistical model for NLOS indoor MIMO channels**, IEEE Veh. Technol. Conf., p. 370-374, Maio 2002.

ZHOU, Y.; YU, W., **Optimized backhaul compression for uplink cloud radio access network**, IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 32, n. 6, p. 1295-1307, Jun. 2014.

SOBRE O ORGANIZADOR

Henrique Ajuz Holzmann - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-449-8

