



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

Marco Antonio Beserra de Melo

**Diversidade Multiusuário em Sistemas Cooperativos
com Múltiplos Relays: Um Esquema de Seleção
Eficiente e de Baixa Complexidade**

FORTALEZA – CEARÁ
AGOSTO 2012

Autor:

Marco Antonio Beserra de Melo

Orientador:

Prof. Dr. Daniel Benevides da Costa

Diversidade Multiusuário em Sistemas Cooperativos com Múltiplos
Relays: Um Esquema de Seleção Eficiente e de Baixa Complexidade

Dissertação de Conclusão de Mestrado
apresentada à Coordenação do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Teleinformática da
Universidade Federal do Ceará como
parte dos requisitos para obtenção do
grau de **Mestre em Engenharia de
Teleinformática.**

FORTALEZA – CEARÁ

AGOSTO 2012

MARCO ANTONIO BESERRA DE MELO

Diversidade Multiusuário em Sistemas Cooperativos com Múltiplos Relays: Um Esquema de Seleção Eficiente e de Baixa Complexidade

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do diploma de Mestre em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará.

Marco Antonio Beserra de Melo
Banca Examinadora:

Prof. Dr. Daniel Benevides da Costa
Universidade Federal do Ceará
Orientador

Prof. Dr. José Cândido Silveira S. Filho
Universidade Estadual de Campinas
Examinador

Prof. Dr. Charles Casimiro Cavalcante
Universidade Federal do Ceará
Examinador

Prof. Dr. André Lima Férrer de Almeida
Universidade Federal do Ceará
Examinador

Fortaleza, 17 de Agosto de 2012

Resumo

Nesse trabalho, propõe-se um esquema de seleção eficiente e de baixa complexidade para redes cooperativas multiusuário multi-*relay* compostas de um nó fonte, L nós destinos e N nós *relays*. O esquema proposto primeiro seleciona o melhor destino baseado na qualidade de canal dos *links* diretos e então seleciona o melhor *relay* que provê o melhor caminho da fonte para o destino selecionado. Considerando-se os protocolos de cooperação decodifica-e-encaminha e amplifica-e-encaminha, o desempenho do sistema é investigado. Expressões em forma fechada para a probabilidade de bloqueio são obtidas e validadas por simulações de Monte Carlo. Comparações com o esquema de seleção ótimo são realizadas e demonstram que o desempenho do esquema de seleção proposto é bem próximo ao do esquema ótimo, com a vantagem de o primeiro possuir uma complexidade menor que o último. Além disso, em nossa análise, a fonte pode ser equipada com uma única antena ou com M múltiplas antenas. Uma análise assintótica é realizada e revela que, independentemente da estratégia de cooperação empregada, a ordem de diversidade é de $L + N$ para o caso da fonte com uma única antena, enquanto que para o caso multiantena a diversidade é igual a $ML + N$. Os efeitos do número de nós *relays* e destinos no desempenho do sistema e sua influência na posição ótima do *relay* são examinados. Além disso, um compromisso entre desempenho e eficiência espectral é observado para o caso em que múltiplas antenas são empregadas.

Palavras-chaves: Diversidade por cooperação, Diversidade multiusuário, Probabilidade de bloqueio, Análise assintótica, Esquema de seleção eficiente e de baixa complexidade.

Abstract

In this work, it is proposed an efficient low-complexity selection scheme for multiuser multi-relay downlink cooperative networks comprised of one source node, L destination nodes, and N relay nodes. The proposed scheme first selects the best destination node based on the channel quality of the direct links and then selects the best relay that yields the best path from the source to the selected destination. Assuming both decode-and-forward and amplify-and-forward relaying strategies, the performance of the considered system is investigated. Closed-form expressions for the outage probability are obtained and validated by means of Monte Carlo simulations. Comparisons with the optimal selection scheme are performed and shows that the performance of the proposed scheme is very close to that of the optimal selection scheme, with the proposed scheme having the advantage of lower complexity than the optimal scheme. Furthermore, in our analysis, the source node may be equipped with either a single antenna or M multiple antennas. An asymptotic analysis is carried out, and it reveals that, regardless of the relaying strategy employed, the diversity order reduces to $L + N$ for the single-antenna source case, whereas it is equal to $ML + N$ for the multiple-antenna source case. The effects of the number of relay and destination nodes on the system performance and its influence on the best relay position are examined. In addition, a trade-off concerning the system performance and spectral efficiency is observed when multiple antennas are employed at the source node.

Keywords: Cooperative diversity, Multiuser diversity, Outage probability, Asymptotic analysis, Efficient low-complexity selection schemes.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus, sem o qual nada nas nossas vidas seria possível. Depois, a minha família e namorada que tanto me apoiaram ao longo deste trabalho. Gostaria de mencionar os sinceros agradecimentos ao orientador, Prof. Dr. Daniel Benevides da Costa, pela paciência e pelos valiosos ensinamentos compartilhados ao longo do mestrado. Finalmente, embora não menos importantes, aos amigos e colegas integrantes do Grupo de Pesquisa em Telecomunicação Sem Fio (GTEL), pela força e apoio demonstrados em todos os momentos.

"Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá."

Ayrton Senna

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Acrônimos	viii
Lista de Publicações	xii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Organização da Dissertação	4
2 Comunicações Móveis e Cooperativas: Conceitos Fundamentais	6
2.1 Sistemas de Comunicações Móveis	6
2.1.1 Breve Histórico	7
2.1.2 Características dos Sistemas Móveis Sem Fio	10
2.1.2.1 Ruído Aditivo Branco Gaussiano	10
2.1.2.2 Efeitos de Propagação de Larga Escala	11
2.1.2.3 Efeitos de Propagação de Pequena Escala	12
2.1.2.4 Perfil de Atraso de Potência	13
2.1.3 Duplexação e Múltiplo Acesso	16
2.1.4 Técnicas de Combinação de Diversidade	21
2.2 Comunicações Cooperativas	22
2.2.1 Protocolos de Cooperação	25
2.2.1.1 Protocolos de Cooperação Fixos	26
2.2.1.2 Protocolos de Cooperação Adaptativos	30
2.2.2 Redes Multinós	31
2.2.3 Esquemas de Seleção de <i>Relays</i>	32
2.3 Cooperação em Redes Multiusuário - Trabalhos Relacionados	33
3 Redes Cooperativas Multiusuário com Múltiplos <i>Relays</i>: Proposta de um Esquema de Seleção Eficiente e de Baixa Complexidade	36
3.1 Modelo Sistêmico	37
3.2 Esquema de Seleção Proposto	38

3.3	Vantagens e Desvantagens do Esquema de Seleção Proposto	40
3.3.1	Vantagens	40
3.3.2	Desvantagens	42
3.4	Modelo de transmissão considerando a fonte equipada com uma única antena	42
3.4.1	Decodifica-e-Encaminha (DF)	42
3.4.2	Amplifica-e-Encaminha (AF)	43
3.5	Modelo de transmissão considerando a fonte equipada com múltiplas antenas	44
3.6	Análise de Desempenho - Probabilidade de Bloqueio	45
3.6.1	Decodifica-e-encaminha (DF)	46
3.6.2	Amplifica-e-encaminha com ganho variável (AF_{VG})	47
3.6.3	Amplifica-e-encaminha com ganho fixo (AF_{FG})	49
3.7	Análise Assintótica	50
4	Resultados Numéricos, Simulações e Discussões	53
4.1	Comparação entre o esquema de seleção proposto e o esquema de seleção conjunta (ótimo)	54
4.1.1	Posicionamento dos nós uniformemente distribuído	54
4.1.2	Posicionamento dos nós fixo	54
4.2	Probabilidade de <i>outage</i> e análise assintótica para diferentes protocolos de cooperação	58
4.3	Probabilidade de <i>outage</i> para diferente número de antenas na fonte	59
4.4	Impacto de N e L na posição do <i>relay</i>	60
5	Conclusões e Perspectivas	64
	Referências Bibliográficas	69

Lista de Figuras

1.1	Esquema simples de cooperação	3
2.1	Exemplo de perfil de atraso de potência (extraído de [1]).	13
2.2	Seção da resposta espectral do canal com perfil de atraso de potência mostrado na Fig. 2.1 (extraído de [1]).	15
2.3	Manifestações do Canal Móvel.	16
2.4	Esquemas de transmissão e recepção em sistemas de comunicação. (a) Simples, (b) Half-Duplex, (c) Full-Duplex.	17
2.5	Duplexação por Divisão de Tempo e de Frequência.	17
2.6	Acesso Múltiplo por Divisão em Frequência (extraído de [2]).	19
2.7	Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo (extraído de [2]).	19
2.8	Acesso Múltiplo por Divisão em Código (extraído de [2]).	20
2.9	Acesso Múltiplo por Divisão no Espaço (extraído de [2]).	21
2.10	Canal <i>relay</i> (extraído de [1]).	24
2.11	Modelo de cooperação simplificado (extraído de [1]).	24
2.12	Protocolo Amplifica-e-Encaminha (extraído de [3]).	27
2.13	Protocolo Decodifica-e-Encaminha (extraído de [3]).	28
2.14	Cooperação Codificada (extraído de [3]).	30
3.1	Modelo sistêmico a ser analisado.	37
4.1	Probabilidade de <i>outage</i> versus SNR sistêmica para posicionamento de nós uniformemente distribuído e diferente número de nós destino (Decodifica-e-Encaminha).	55
4.2	Probabilidade de <i>outage</i> versus SNR sistêmica para posicionamento de nós fixo e diferente número de nós destino (Decodifica-e-Encaminha).	55
4.3	Probabilidade de <i>outage</i> versus SNR sistêmica para posicionamento de nós uniformemente distribuído e diferente número de nós destino (Amplifica-e-Encaminha com ganho variável).	56
4.4	Probabilidade de <i>outage</i> versus SNR sistêmica para posicionamento de nós fixo e diferente número de nós destino (Amplifica-e-Encaminha com ganho variável).	57

4.5	Probabilidade de <i>outage</i> versus SNR sistêmica para posicionamento de nós uniformemente distribuído e diferente número de nós destino (Amplifica-e-Encaminha com ganho fixo).	58
4.6	Probabilidade de <i>outage</i> versus SNR sistêmica para posicionamento de nós fixo e diferente número de nós destino (Amplifica-e-Encaminha com ganho fixo).	59
4.7	Probabilidade de <i>outage</i> versus SNR sistêmica para os três protocolos de cooperação e diferentes números de nós ($N = 2, L = 3$; $N = 3, L = 2$; $N = L = 4$) para o caso de fonte com uma antena ($M = 1$).	60
4.8	Probabilidade de <i>outage</i> versus SNR sistêmica para os três protocolos de cooperação, assumindo $N = L = 3$ e múltiplas antenas na fonte ($M = 1, 2$ e 4).	61
4.9	Probabilidade de <i>outage</i> versus distância fonte-relay d_{SR^*} para diferentes números de destinos.	61
4.10	Probabilidade de <i>outage</i> versus distância fonte-relay d_{SR^*} para diferentes números de relays.	62
4.11	Probabilidade de <i>outage</i> versus distância fonte-relay d_{SR^*} para diferentes números de destinos.	63
4.12	Probabilidade de <i>outage</i> versus distância fonte-relay d_{SR^*} para diferentes números de relays.	63

Lista de Acrônimos

- 3G** Terceira Geração (3G, do inglês *Third Generation*)
- 4G** Quarta Geração (4G, do inglês *Fourth Generation*)
- ACK** Recepção confirmada (ACK, do inglês *Acknowledgement*)
- AF** Amplifica e Encaminha (AF, do inglês *Amplify-and-Forward*)
- AMPS** Serviço de Telefonia Móvel Avançado (AMPS, do inglês *Advance Mobile Phone Service*)
- AWGN** Ruído Aditivo Branco Gaussiano (AWGN, do inglês *Additive White Gaussian Noise*)
- CDMA** Acesso Múltiplo por Divisão em Código (CDMA, do inglês *Code Division Multiple Access*)
- CF** Comprime e Encaminha (CF, do inglês *Compress-and-Forward*)
- CRC** Checagem de Redundância Cíclica (CRC, do inglês *Cyclic Redundancy Check*)
- CSI** Informação sobre o Estado do Canal (CSI, do inglês *Channel State Information*)
- DARPA** Agência de Defesa em Pesquisas em Projetos Avançados (DARPA, do inglês *Defense Advanced Research Projects Agency*)
- dB** Decibel
- DF** Decodifica e Encaminha (DF, do inglês *Decode-and-Forward*)
- DSAM** Mensagem de Reconhecimento de Seleção de Destino (DSAM, do inglês *Destination Selection Acknowledge Message*)
- DSRM** Mensagem de Requisição de Seleção de Destino (DSRM, do inglês *Destination Selection Request Message*)

EDGE Evolução do Serviço de Dados para GSM (EDGE, do inglês *Enhanced Data Services for GSM Evolution*)

EGC Combinação por Ganho Igual (EGC, do inglês *Equal-Gain Combining*)

ETACS Sistema Europeu de Acesso Total à Comunicação (ETACS, do inglês *European Total Access Communication System*)

FCC Comissão Federal de Comunicações (FCC, do inglês *Federal Communications Commission*)

FDD Duplexação por Divisão de Frequência (FDD, do inglês *Frequency Division Duplex*)

FDMA Acesso Múltiplo por Divisão em Frequência (FDMA, do inglês *Frequency Division Multiple Access*)

FSK Modulação por Chaveamento de Frequência (FSK, do inglês *Frequency-Shift Keying*)

GPRS Serviço Geral de Rádio por Pacotes (GPRS, do inglês *General Packet Radio Service*)

GSM Sistema Global para Comunicações Móveis (GSM, do inglês *Global System for Mobile Communications*)

IS Padrão Interino (IS, do inglês *Interim Standard*)

ISI Interferência Inter-Simbólica (ISI, do inglês *Inter-Symbol Interference*)

ISM Industrial, Científica e Médica (ISM, do inglês *Industrial, Scientific and Medical*)

ITU União Internacional de Telecomunicações (ITU, do inglês *International Telecommunications Union*)

Kbps Kilobits por segundo

KHz KiloHertz

LTE Evolução a Longo Prazo (LTE, do inglês *Long Term Evolution*)

Mbps Megabits por segundo

MHz MegaHertz

MIMO Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas (MIMO, do inglês *Multiple Input Multiple Output*)

MRC Combinação por Razão Máxima (MRC, do inglês *Maximal-Ratio Combining*)

MUD Diversidade Multiusuário (MUD, do inglês *Multiuser Diversity*)

OFDM Multiplexação por Divisão Ortogonal em Frequência (OFDM, do inglês *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*)

RSAM Mensagem de Requisição de Seleção de *relay* (RSAM, do inglês *Relay Selection Acknowledge Message*)

SDC Combinação de Diversidade por Seleção (SDC, do inglês *Selection Diversity Combining*)

SDMA Acesso Múltiplo por Divisão Espacial (SDMA, do inglês *Space Division Multiple Access*)

SER Taxa de Erro de Símbolo (SER, do inglês *Symbol Error Rate*)

SMS Serviço de Mensagens Curtas (SMS, do inglês *Short Messages Service*)

SNR Relação Sinal Ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*)

TDD Duplexação por Divisão do Tempo (TDD, do inglês *Time Division Duplex*)

TDMA Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo (TDMA, do inglês *Time Division Multiple Access*)

ThC Combinação por limiar (ThC, do inglês *Threshold Combining*)

UMB Banda Ultra Larga Móvel (UMB, do inglês *Ultra Mobile Broadband*)

W-CDMA Acesso Múltiplo de Banda Larga por Divisão de Código (W-CDMA, do inglês *Wideband Code Division Multiple Access*)

WLAN Redes Locais Sem Fio (WLAN, do inglês *Wireless Local Area Network*)

WiMAX Interoperabilidade Mundial para Acesso Microonda (WiMAX, do inglês *Worldwide Interoperability for Microwave Access*)

Lista de Publicações

► Publicações em Periódicos

1. Marco A. B. de Melo and Daniel B. da Costa, “*An Efficient Relay-Destination Selection Scheme for Multiuser Multirelay Downlink Cooperative Networks*”, *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 61, no. 5, pp. 2354-2360, Jun. 2012.

► Publicações em Congressos

1. Marco A. B. de Melo and Daniel B. da Costa, “*Downlink Performance of Multiuser Multi-Relay Cooperative Networks: A Low-Complexity Relay-Destination Selection Scheme*”, 18th *European Wireless Conf.*, 18-20 April 2012, Poznań, Poland.
2. Marco A. B. de Melo e Daniel B. da Costa, “*A Low-Complexity Selection Scheme for Multiuser Multirelay Downlink Cooperative Networks*”, Aceito no XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 13-16 Setembro de 2012, Brasília, Brasil.

Capítulo 1

Introdução

A recente evolução observada nos sistemas de comunicação tem proporcionado uma crescente modificação do processo de comunicação na sociedade moderna. Tal evolução não se decorreu exclusivamente do ponto de vista do processamento de sinais, mas também no que diz respeito aos serviços prestados aos mais diversos usuários, cada qual com suas necessidades específicas.

Assim, indústria e pesquisa têm unido forças no intuito de promover o desenvolvimento de novas tecnologias que garantam o fornecimento de diferentes serviços, assegurando ainda a qualidade de serviço mínima necessária aos usuários que, por sua vez, anseiam por serviços mais rápidos e confiáveis.

Quando se trata de comunicações móveis, o desafio de prover comunicação rápida e de qualidade é ainda maior se comparado aos convencionais sistemas cabeados. Isso porque os sistemas sem fio lidam com atenuações devido à perda de percurso e variações de canal em ambientes com desvanecimento, além de possuírem recursos escassos e limitados. Por isso, desde os sistemas analógicos de primeira geração até os atuais sistemas digitais, muitas modificações têm sido propostas.

Sempre no intuito de corrigir erros provenientes de perda de percurso, somreamento e multipercursos, diversos esquemas de modulação, codificação e multiplexação foram propostos. Nas novas gerações de sistemas de comunicação sem fio, diversas técnicas têm sido estudadas, como é o caso do OFDM, dos códigos turbo, entre outras. Além dessas, uma técnica bastante utilizada buscando melhoria da qualidade do enlace sem fio consiste na repetição da informação em variadas dimensões.

Essa repetição de informações é denominada diversidade e pode ser implementada no domínio do tempo, da frequência, em código ou ainda no domínio espacial. Nada impede que mais de um tipo de diversidade seja empregado dentro de um mesmo sistema, dando origem a sistemas de diversidade tempo-frequência, espaço-temporal, espaço-frequência e assim sucessivamente.

Uma das técnicas mais utilizadas na implementação de diversidade espacial denomina-se MIMO. No contexto de comunicações móveis sem fio, a técnica MIMO consiste na utilização de múltiplas antenas de transmissão e/ou recepção. Assim, os múltiplos percursos, decorrentes do emprego de múltiplas antenas, enfrentam diferentes respostas de canal e são, portanto, independentes, caracterizando a diversidade espacial.

Infelizmente, a utilização de sistemas MIMO implica em elevada complexidade e custo de hardware dos terminais móveis. Além disso, devido à constante miniaturização dos terminais móveis, o emprego de múltiplas antenas pode não ser uma opção válida. Isso porque, para garantir a decorrelação dos sinais, faz-se necessário um espaçamento mínimo entre as antenas.

Assim, como uma alternativa de implementação de diversidade espacial contornando os percalços do MIMO, surgiu a ideia de um arranjo virtual de antenas. Tal arranjo seria distribuído e consistiria no emprego de outros terminais no auxílio à transmissão da informação de um dado terminal, chamado fonte, como pode ser observado na Fig. 1.1. Tal esquema ficou tecnicamente conhecido como diversidade por cooperação [4]. Os terminais que auxiliam a comunicação são conhecidos como *relays*. Dessa forma, o sinal que chega ao destino final é uma combinação do sinal proveniente da fonte e/ou do(s) *relay(s)*, caracterizando a diversidade espacial.

A utilização de cooperação em redes de comunicação sem fio só foi possível devido à natureza difusa (*broadcast*) do canal sem fio. É importante salientar que embora o conceito de comunicações cooperativas tenha surgido como uma alternativa aos esquemas MIMO, pode-se ainda utilizar as duas técnicas conjuntamente, trazendo-se assim melhorias substanciais em termos de desempenho e qualidade de enlace à comunicação.

Outro conceito bem estabelecido nos sistemas de comunicações móveis é o de diversidade multiusuário. A diversidade multiusuário é um tipo de diversidade inerente aos sistemas multiusuário. A ideia principal consiste no fato de que quando muitos usuários experimentam condições de desvanecimento profundo (*deep fading*),

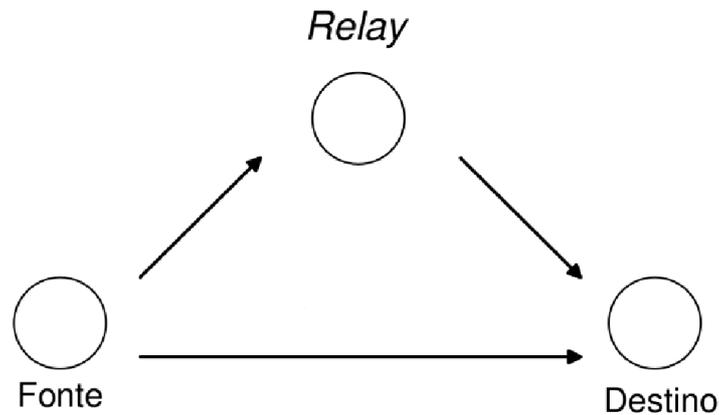


Figura 1.1: Esquema simples de cooperação

existirá um usuário que num dado momento possuirá boa qualidade de canal com grande probabilidade [5].

1.1 Objetivos

A combinação desses dois tipos de diversidade (cooperação e multiusuário) têm sido investigada com o intuito de melhorar substancialmente a qualidade da transmissão em redes sem fio. Assim, utiliza-se a seleção de usuários de modo a garantir ganhos elevados de diversidade e eficiência espectral.

Assim, essa dissertação tem como objetivo propor um esquema de seleção de nós em redes multi-*relay* multiusuário eficiente e de baixa complexidade. Baseando-se na probabilidade de *outage*, realiza-se também uma comparação entre o esquema de seleção proposto e o esquema de seleção conjunta (ótimo).

É nessa comparação que as características de eficiência e baixa complexidade são evidenciadas. Como será observado a seguir, o esquema proposto é eficiente no sentido de que possui desempenho próximo ao ótimo, enquanto possui baixa complexidade devido à redução do número de estimativas de canal e do número de comparações entre *links*. Além disso, o esquema proposto pode ser implementado de forma centralizada ou distribuída, enquanto o esquema ótimo só pode ser implementado de forma centralizada.

Como será explicitado mais adiante, essas características são de grande importância no contexto das próximas gerações de comunicação sem fio. Como se sabe, nos sistemas 4G existe a necessidade de comunicações mais rápidas e eficientes

mesmo em regiões remotas. Um desempenho de *outage* próximo ao do esquema ótimo demonstra o valor do esquema proposto nesse sentido. Além disso, nas novas gerações observa-se um aumento da densidade das redes, o que faz com que a redução do número de estimações de canal e comparações entre *links* seja uma característica importante do esquema de seleção proposto. Por esses motivos, o esquema proposto apresenta-se como uma técnica de seleção promissora no contexto das novas gerações de redes sem fio.

A comparação de desempenho entre os dois esquemas foi realizada em termos da probabilidade de *outage*. Para tanto, expressões em forma fechada foram obtidas e uma análise assintótica das mesmas foi desenvolvida. A confiabilidade das expressões foi analisada através de simulação de Monte Carlo e gráficos foram gerados.

Resumidamente, os principais objetivos desta dissertação são:

- ▶ Propor um esquema de seleção eficiente e de baixa complexidade para redes de cooperação multiusuário;
- ▶ Comparar o esquema de seleção proposto com o esquema de seleção conjunta (ótimo);
- ▶ Obter expressões fechadas para a probabilidade de *outage* considerando um modelo sistêmico definido;
- ▶ Realizar uma análise assintótica das expressões de *outage* de modo a extrair informações mais claras a respeito do esquema de seleção proposto;
- ▶ Sustentar a validade das expressões através de simulação numérica, provendo meios gráficos de comparação entre os dois esquemas (proposto e ótimo).

1.2 Organização da Dissertação

O restante desta dissertação está estruturado da seguinte forma:

- ▶ Cap. 2:
 - Revisão bibliográfica dos conceitos básicos envolvendo comunicações móveis sem fio e cooperativas;
 - Trabalhos relacionados à união entre diversidade de cooperação e diversidade multiusuário.

▶ Cap. 3:

- Apresentação do modelo sistêmico a ser analisado;
- Descrição do esquema de seleção proposto;
- Vantagens e desvantagens do esquema;
- Obtenção das expressões em forma fechada para a probabilidade de *outage*;
- Análise assintótica das expressões de *outage*.

▶ Cap. 4:

- Resultados numéricos;
- Simulação;
- Discussões.

▶ Cap. 5:

- Conclusões.

▶ Referências

Capítulo 2

Comunicações Móveis e Cooperativas: Conceitos Fundamentais

Com o intuito de facilitar a compreensão deste trabalho, alguns conceitos se tornam importantes. Neste capítulo serão discutidas algumas características dos sistemas móveis sem fio em geral e os conceitos básicos de comunicações cooperativas.

2.1 Sistemas de Comunicações Móveis

Sistemas de comunicação sem fio são um ramo em rápido crescimento nos últimos anos, que tem captado não só o interesse da comunidade científica, mas da mídia em geral, e despertado o imaginário público para o futuro. Redes de telefonia celular se tornaram uma ferramenta indispensável nas grandes organizações e na maior parte da vida pessoal dos indivíduos dos países desenvolvidos e estão cada vez mais ocupando o espaço que antigamente pertencia ao sistema de telefonia fixo.

Além disso, novos sistemas de Redes Locais Sem Fio (WLAN, do inglês *Wireless Local Area Network*) têm substituído as antigas redes cabeadas, tanto no segmento empresarial quanto no residencial, passando pelas instituições governamentais. Novas aplicações, incluindo redes de sensores sem fio, fábricas e auto-estradas automatizadas, casas inteligentes, monitoramento médico, entre outros, estão emergindo do campo da pesquisa para sistemas concretos.

Apesar do crescimento explosivo alcançado nas últimas décadas, muitos desafios

permanecem no que tange à eficiência das redes sem fio no alcance do desempenho necessário para atender aplicações emergentes. Redes cooperativas surgem no intuito de superar alguns desses desafios, pois exploram a natureza *broadcast* do meio sem fio de forma a emular um sistema de múltiplas antenas.

2.1.1 Breve Histórico

Os primeiros sistemas de comunicação sem fio surgiram na era pré-industrial. Esses sistemas transmitiam informação em distâncias de linha de visada usando sinais de fumaça, sinalização com tochas, reflexão da luz em espelhos, entre outros. Já nessa época o conceito de *relay*, ainda que restrito, já estava associado a estações de observação posicionadas no alto de montanhas e ao longo de estradas no intuito de fazer a retransmissão do sinal através de longas distâncias [2].

Esses sistemas de comunicações foram primeiramente substituídos pelo telégrafo (inventado por Samuel Morse em 1838) e, alguns anos mais tarde, pelos sistemas telefônicos. Poucos anos depois do invento do telefone, Marconi realizou a primeira transmissão via rádio. Tal tecnologia avançou rapidamente até alcançar maiores distâncias com melhor qualidade de transmissão, menores potências e dispositivos menores e mais baratos.

Em 1971, foi montada a primeira rede via rádio com o sistema ALOHANET, que permitia a comunicação de computadores espalhados ao longo de quatro ilhas no Hawai. Tal arquitetura de rede utilizava uma topologia do tipo estrela onde quaisquer dois computadores poderiam estabelecer uma comunicação bidirecional passando por um *hub* central. O ALOHANET incorporou o primeiro conjunto de protocolos de acesso ao meio e roteamento de pacotes em sistemas de rádio, e muitos dos princípios utilizados na época são aplicados até hoje.

Tal sistema despertou o interesse do exército americano e em meados da década de 70 e início da década de 80, a Agência de Defesa em Pesquisas em Projetos Avançados (DARPA, do inglês *Defense Advanced Research Projects Agency*) investiu significativamente em pesquisas para desenvolvimento de redes de pacotes via rádio para comunicação tática no campo de batalha. Redes de pacotes via rádio também encontraram aplicação comercial em redes de serviços de dados sem fio, tais como e-mail, transferência de arquivos e *web browsing*.

A introdução da tecnologia cabeada Ethernet na década de 70 direcionou diversas empresas para longe da tecnologia via rádio. Velocidades de até 10 Mbps

proporcionadas pelas redes Ethernet superaram em muito as baixas taxas alcançadas pelos sistemas via rádio. Em 1985, a Comissão Federal de Comunicações (FCC, do inglês *Federal Communications Commission*) permitiu o desenvolvimento comercial de redes sem fio, autorizando o uso público das bandas de frequência da ISM para produtos WLAN. Entretanto, os sistemas WLAN não podiam interferir com a banda de frequência primária já utilizada pela Industrial, Científica e Médica (ISM, do inglês *Industrial, Scientific and Medical*). Assim, a interferência dos usuários já existentes na ISM era muito elevada nas novas bandas usadas pelos sistemas WLAN. Como resultado, os sistemas WLAN iniciais possuíam baixo desempenho em termos de taxa de dados e cobertura. Tudo isso, aliado às preocupações com segurança, padronização e o alto custo, resultou em baixas vendas.

A aplicação de redes móveis sem fio que obteve maior sucesso foi o sistema de telefonia celular. As raízes desse sistema começam em 1915, quando a primeira transmissão de voz sem fio entre Nova Iorque e São Francisco foi estabelecida. Em 1946, o serviço público de telefonia móvel foi introduzido em 25 cidades dos Estados Unidos. Esse sistema utilizava um único transmissor para cobrir toda a área e a capacidade do sistema estava comprometida.

A solução para o problema surgiu durante as décadas de 50 e 60 quando pesquisadores do laboratório da AT&T desenvolveram o conceito de célula [6]. Sistemas celulares exploram o fato de que a potência do sinal transmitido cai com a distância. Assim, dois usuários podem operar em uma mesma frequência desde que obedeçam uma certa distância de separação.

O primeiro sistema celular analógico foi implementado em Chicago em 1983 e já estava saturado em 1984. Foi quando a FCC teve que aumentar a alocação espectral de 40 MHz para 50 MHz. O crescimento explosivo da indústria celular continuou e, por volta dos anos 80, mais e mais cidades saturaram sua demanda pelo serviço celular. Surgiu-se a necessidade do desenvolvimento da tecnologia digital, com o intuito de aumentar a capacidade e melhorar o desempenho do sistema.

Assim, no início década de 90, surgiu a segunda geração de sistemas celulares, que é baseada em comunicações digitais. A mudança de sistemas analógicos para digitais trouxe benefícios em termos de capacidade, custo, velocidade e eficiência. Voltada inicialmente para comunicações de voz, a segunda geração gradualmente ampliou seus horizontes até atingir serviços de dados, tais como e-mail, Internet e Serviço de Mensagens Curtas (SMS, do inglês *Short Messages Service*).

Devido à incompatibilidade entre o Serviço de Telefonia Móvel Avançado (AMPS, do inglês *Advance Mobile Phone Service*) e o Sistema Europeu de Acesso Total à Comunicação (ETACS, do inglês *European Total Access Communication System*), sistemas de primeira geração implementados, respectivamente, nos Estados Unidos e Europa, os europeus trataram de convergir rapidamente para um padrão uniforme para sistemas celulares de segunda geração, o Sistema Global para Comunicações Móveis (GSM, do inglês *Global System for Mobile Communications*). Diferentemente do AMPS, que usava canais de voz com Acesso Múltiplo por Divisão em Frequência (FDMA, do inglês *Frequency Division Multiple Access*) com 30 KHz, o GSM utilizava uma combinação de Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo (TDMA, do inglês *Time Division Multiple Access*) com salto em frequência FSK para modulação de voz. Já nos Estados Unidos, uma longa discussão sobre as técnicas de divisão do espectro disponível geraram uma larga variedade de sistemas, tais como IS-54, IS-95 e IS-136. Essa proliferação de padrões tornou difícil a realização de *roaming*, que é a conexão do usuário em uma área fora da localidade geográfica onde o mesmo está registrado.

No que diz respeito à transferência de dados, os sistemas de segunda geração alcançaram taxas acima dos 100 Kbps. Tal evolução é conhecida como Serviço Geral de Rádio por Pacotes (GPRS, do inglês *General Packet Radio Service*). Outra versão ainda mais potente é a Evolução do Serviço de Dados para GSM (EDGE, do inglês *Enhanced Data Services for GSM Evolution*) que aumenta a taxa de dados usando um novo esquema de modulação combinado com codificação de canal.

A terceira geração de sistemas celulares é baseada no padrão de Acesso Múltiplo por Divisão em Código (CDMA, do inglês *Code Division Multiple Access*), desenvolvido pela União Internacional de Telecomunicações (ITU, do inglês *International Telecommunications Union*). O padrão fornecia diferentes taxas de dados dependendo da mobilidade e localização, de 384 Kbps para um uso de baixa mobilidade (pedestre, por exemplo) até 144 Kbps para uso veicular podendo chegar até a 2 Mbps em ambientes *indoor*. O padrão de 3G era incompatível com a tecnologia de segunda geração, por isso as operadoras deveriam investir em uma nova infraestrutura antes de fornecer serviço 3G.

2.1.2 Características dos Sistemas Móveis Sem Fio

Embora separadas por apenas alguns anos, cada nova geração de dispositivos sem fio trouxe significantes melhorias em termos de velocidade de comunicação, dimensão dos dispositivos, vida útil de baterias, novas aplicações, entre outras. Nos últimos anos, a evolução tecnológica atingiu um patamar que levou a comunidade científica a desenvolver arquiteturas de redes de comunicação sem fio que se afastam da idéia tradicional de comunicações centralizadas e passam a apostar nos sistemas baseados em comunicações dispositivo-a-dispositivo.

É o caso, por exemplo, de comunicações *ad hoc* e redes de sensores, onde a hierarquia tradicional das redes tem sido substituída por sistemas distribuídos onde qualquer nó da rede pode interagir enviando informações para qualquer outro nó na rede, estabelecendo caminhos de comunicação que envolvem múltiplos saltos (*hops*).

Uma das ideias principais por trás dos novos rumos da pesquisa científica é que, ao contrário dos laços em comunicações ponto-a-ponto, o canal sem fio é, por natureza, *broadcast*, ou seja, qualquer informação enviada por um nó na rede pode, *a priori*, ser recebida por qualquer outro nó dentro da rede. Essa característica facilita bastante o desenvolvimento de novos conceitos em comunicações e redes distribuídas via cooperação.

Estabelecer comunicação através de um canal sem fio é uma tarefa desafiadora pelo simples fato de o meio sem fio introduzir danos ao sinal. Sinais emitidos em meios sem fio são afetados por efeitos tais como ruído, atenuação, distorção e interferência.

Além disso, podem-se citar algumas características inerentes aos sistemas de comunicações móveis sem fio que interferem negativamente na qualidade dos sinais transmitidos, tais como: espectro limitado, potência de transmissão limitada, divisão do espectro entre os diversos usuários de forma organizada e equitativa e a gerência da mobilidade (*handover, roaming*). Citemos nesse ponto alguns dos Aspectos que degradam a qualidade do sinal transmitido através do meio sem fio.

2.1.2.1 Ruído Aditivo Branco Gaussiano

Muito dos danos causados aos sinais são aditivos por natureza, o que quer dizer que eles afetam o sinal transmitido adicionando ruído. O ruído branco aditivo gaussiano (AWGN) e interferências de diferentes naturezas e origens são bons

exemplos de danos aditivos. O canal AWGN é talvez o mais simples entre todos os modelos de canal. A relação entre os sinais de saída $y(t)$ e entrada $x(t)$ é dada por

$$y(t) = \frac{x(t)}{\sqrt{\Gamma}} + n(t), \quad (2.1)$$

onde Γ é a perda de potência do sinal transmitido $x(t)$ e $n(t)$, o ruído. O ruído aditivo $n(t)$ é um processo aleatório em que cada realização é modelada como uma variável aleatória com distribuição gaussiana. Esse termo de ruído é geralmente usado para modelar o ruído de fundo do canal, bem como o ruído introduzido na entrada do receptor. O ruído gaussiano também é frequentemente usado para modelar alguns tipos de interferência interusuário, embora, em geral, esse processo não siga rigorosamente uma distribuição gaussiana [1].

2.1.2.2 Efeitos de Propagação de Larga Escala

A perda de percurso é um fator importante que contribui para as perdas no sinal, reduzindo sua potência. A perda de percurso é a atenuação sofrida pelo sinal à medida que este se propaga da fonte até o destino. A perda de percurso é medida como o valor em dB da razão entre a potência do sinal transmitida e a recebida. O valor da perda de percurso é altamente dependente de vários fatores relacionados a todo o *setup* de transmissão. Em geral, a perda de percurso é caracterizada por uma função da forma

$$\Gamma_{dB} = 10 \log \left(\frac{d}{d_0} \right)^\rho + c, \quad (2.2)$$

onde Γ_{dB} é a perda de percurso Γ medida em dB, d é a distância entre o transmissor e o receptor, ρ é o expoente de perda de percurso, c é uma constante e d_0 é a distância para uma potência medida em um ponto de referência. Em alguns cenários práticos essa expressão não representa uma caracterização exata da perda de percurso, mas ainda é usada como uma aproximação simples e boa. O expoente de perda de percurso ρ caracteriza a taxa de decaimento da potência com a distância, tomando como valores a faixa de 2 (correspondendo à propagação do sinal no espaço livre) até 6. Valores típicos para o expoente de perda de percurso são 4 para um ambiente macrocelular urbano e 3 para o ambiente microcelular urbano [2]. A constante c inclui parâmetros relacionados ao meio físico de transmissão, tais como o comprimento de onda do sinal e altura das antenas.

A Eq. (2.2) mostra a relação entre a perda de percurso e a distância entre

as antenas de transmissão e recepção. Na prática, as perdas de percurso de duas antenas receptoras situadas a uma mesma distância da antena transmissora não são as mesmas. Isso ocorre, em parte, porque o sinal transmitido é obstruído por diferentes objetos à medida que o sinal trafega até o destino. A esse tipo de perda dá-se o nome de sombreamento. Uma vez que a natureza e a localização das obstruções que causam sombreamento não podem ser conhecidas com antecedência, a perda de percurso introduzida por esse efeito é uma variável aleatória. Denotando por S o valor da perda por sombreamento, esse efeito pode ser adicionado em (2.2) como segue

$$\Gamma_{\text{dB}} = 10 \log \left(\frac{d}{d_0} \right)^{\rho} + S + c. \quad (2.3)$$

Através de medidas experimentais foi observado que S , quando medido em dB, pode ser caracterizado como uma variável aleatória com distribuição gaussiana, média zero e desvio padrão σ . Assim, o valor da perda por sombreamento é um valor aleatório que segue uma distribuição lognormal e seu efeito é frequentemente referenciado como desvanecimento lognormal [2].

2.1.2.3 Efeitos de Propagação de Pequena Escala

Da explicação de perda de percurso e sombreamento deve ficar claro que a razão pela qual tais efeitos são classificados como efeitos de propagação em larga escala é que seus efeitos são notáveis sobre distâncias relativamente longas. Existem outros efeitos que são notáveis a distâncias da ordem do comprimento de onda do sinal. Tais efeitos são classificados como efeitos de propagação de pequena escala.

Em comunicações sem fio, um único sinal transmitido encontra refletores, espalhadores e atenuadores aleatórios durante a propagação, resultando em múltiplas cópias do sinal que chegam ao receptor após terem percorrido diferentes caminhos. Tal canal, no qual o sinal que chega ao receptor é constituído por múltiplas cópias do sinal transmitido, é conhecido como canal multipercurso.

Vários fatores influenciam o comportamento da propagação por multipercursos. Um deles é a já mencionada presença de refletores, espalhadores e atenuadores aleatórios. A velocidade do terminal móvel, velocidade dos objetos ao seu redor e a largura de banda do sinal são outros fatores determinantes no comportamento do canal. Além disso, devido à presença de movimento no transmissor, receptor e objetos adjacentes, o canal multipercurso é variante no tempo. As múltiplas cópias

do sinal transmitido, cada uma tendo uma amplitude, fase e atraso diferentes, são adicionadas no receptor, criando interferências construtivas e destrutivas umas com as outras. Isso resulta em um sinal recebido cuja forma varia no tempo.

2.1.2.4 Perfil de Atraso de Potência

A função determinada pela potência média associada com cada caminho é conhecida como perfil de atraso de potência do canal multipercurso. A Fig. 2.1 mostra o perfil de atraso de potência para um canal sem fio típico. Vários parâmetros são obtidos do perfil de atraso de potência ou de sua resposta espectral, que podem ser usados para caracterizar e classificar diferentes canais multipercurso:

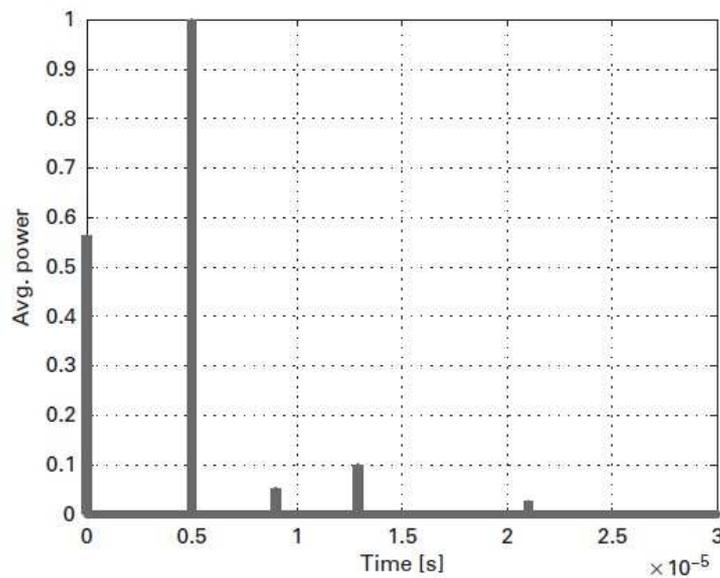


Figura 2.1: Exemplo de perfil de atraso de potência (extraído de [1]).

- O **espalhamento de atraso do canal** é a diferença temporal entre a chegada do primeiro e do último percurso medido. Se o tempo de símbolo for menor que o espalhamento de atraso, os símbolos irão sofrer interferência inter-simbólica (ISI). Note que podem existir vários sinais chegando através de caminhos muito atenuados e que, portanto, não são medidos devido à sensibilidade do receptor. Isso faz com que o conceito de espalhamento de atraso esteja relacionado com a sensibilidade do receptor.
- A **banda de coerência** é a faixa de frequência sobre a qual a amplitude de duas componentes espectrais da resposta do canal são correlacionadas.

Em outras palavras, a banda de coerência fornece uma medida da faixa de frequências sobre a qual o canal apresenta uma resposta em frequência plana, no sentido de que todas as componentes espectrais possuem aproximadamente a mesma amplitude e uma mudança linear de fase. Isso significa que se a largura de banda do sinal transmitido é menor que a banda de coerência do canal, então todas as componentes espectrais do sinal serão afetadas pela mesma atenuação e por uma mudança linear de fase. Nesse caso, o canal é chamado de canal com desvanecimento plano. Por outro lado, uma vez que o sinal vê o canal como um canal com desvanecimento plano, o canal é frequentemente chamado de canal de banda estreita. No entanto, se a largura de banda do sinal transmitido é maior que a banda de coerência do canal, então as componentes espectrais do sinal serão afetadas por diferentes atenuações. Nesse caso, o canal é dito seletivo em frequência ou canal de banda larga.

Quando um canal sofrerá desvanecimento seletivo ou plano vai depender não só do espalhamento de atraso do canal, mas também das características do sinal sendo transmitido. A Fig. 2.2 mostra uma seção da resposta espectral do canal com perfil de atraso de potência mostrado na Fig. 2.1. Pode-se observar que se o sinal possui uma largura de banda maior que poucas dezenas de KiloHertz, o canal afetará diferentemente aquelas componentes espectrais do sinal transmitido que estão suficientemente afastadas. Uma vez que o atraso associado com algum multipercorso é maior que o tempo de símbolo, o canal será seletivo em frequência e o sinal sofrerá ISI.

Em adição ao perfil de atraso de potência e ao espalhamento de atraso do canal, existem outros parâmetros relacionados às características de variação temporal do canal sem fio. Como dito antes, a mobilidade do transmissor, do receptor e dos objetos refletoras, espalhadores e atenuadores ao longo da propagação do sinal cria uma mudança nas características do canal variantes no tempo. Tal mobilidade também introduz saltos em frequência devido ao efeito Doppler.

Para caracterizar o canal em termos de efeito Doppler é necessário observar a variação do perfil de potência do canal no tempo. Em outras palavras, ao invés de considerar a estatística do canal entre duas frequências num instante de tempo fixo, observa-se agora como uma mesma componente de frequência varia temporalmente. Os parâmetros considerados nesse caso são:

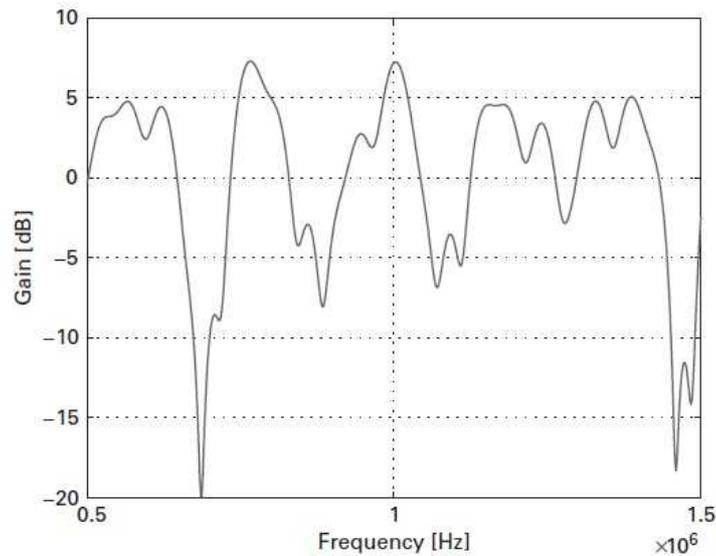


Figura 2.2: Seção da resposta espectral do canal com perfil de atraso de potência mostrado na Fig. 2.1 (extraído de [1]).

- Para um canal invariante no tempo, o coeficiente da resposta impulsiva do canal correspondendo a um multipercursado é uma variável aleatória. Quando o canal muda com o tempo, o coeficiente torna-se um processo aleatório, onde cada realização do canal em diferentes instantes de tempo é uma variável aleatória. Essas variáveis aleatórias podem ou não ser correlacionadas. O **tempo de coerência do canal** é a diferença temporal que faz com que a correlação entre duas realizações da resposta ao impulso do canal seja aproximadamente nula. A transformada de Fourier da função de autocorrelação dos coeficientes do canal é conhecida como espectro Doppler do canal. O espectro Doppler caracteriza estatisticamente como a resposta do canal alarga o espectro de um sinal de entrada devido ao efeito Doppler, ou seja, se um único pulso de frequência f_c é enviado pelo canal, devido ao efeito Doppler f_d , o espectro Doppler terá componentes na faixa de $f_c - f_d$ até $f_c + f_d$.
- O **espalhamento Doppler** é definido como a faixa de frequências sobre a qual o espectro Doppler é não nulo. O espalhamento Doppler é o inverso do tempo de coerência do canal e, como tal, fornece informação sobre quão rápido o canal muda no tempo. Novamente, a noção de quão rápido o canal varia é dependente também do sinal de entrada. Se o tempo de coerência do canal é maior que o tempo de símbolo do sinal transmitido, ou equivalentemente, se o

espalhamento Doppler é menor que a largura de banda do sinal, o canal mudará em um período de tempo maior que a duração do símbolo de entrada. Nesse caso, o canal é dito ser de desvanecimento lento (*slow fading*). Caso contrário, o canal é conhecido como sendo de desvanecimento rápido (*fast fading*).

Em comunicações móveis de última geração, onde requisitos de mobilidade e taxa são bastante rigorosos, o canal móvel é sempre caracterizado como sendo seletivo em frequência e possuindo desvanecimento rápido. O que nos leva ao pior caso no que tange ao nível de degradação do sinal transmitido. A Fig. 2.3 apresenta as diferentes manifestações do canal de rádio móvel.

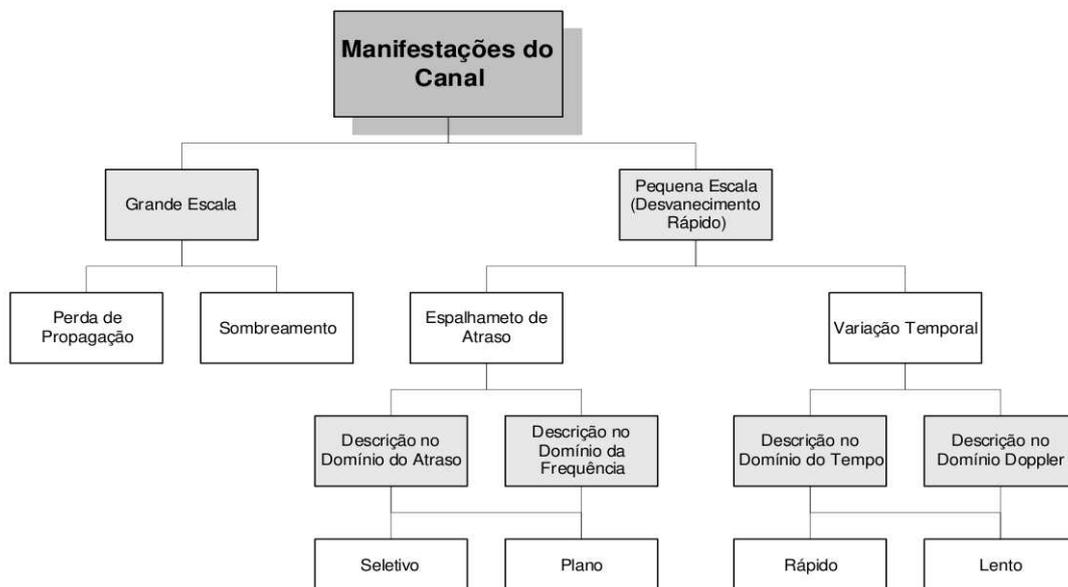


Figura 2.3: Manifestações do Canal Móvel.

2.1.3 Duplexação e Múltiplo Acesso

Um canal em um sistema de comunicação pode ser classificado quanto à capacidade de transmissão de informações em *simplex*, *half-duplex* e *full-duplex*. Em canais *simplex* a transmissão de informações se dá apenas em um único sentido, do emissor para um ou mais receptores. Em canais *half-duplex* a transmissão pode ser feita no dois sentidos. Cada extremidade do canal pode transmitir informações, no entanto, isso deve ser feito alternadamente e não nos dois sentidos ao mesmo tempo. Em canais *full-duplex* as transmissões podem ser feitas simultaneamente e nos dois sentidos, ou seja, um dispositivo pode transmitir informação ao mesmo tempo em que pode recebê-la. A Fig. 2.4 ilustra os três esquemas.

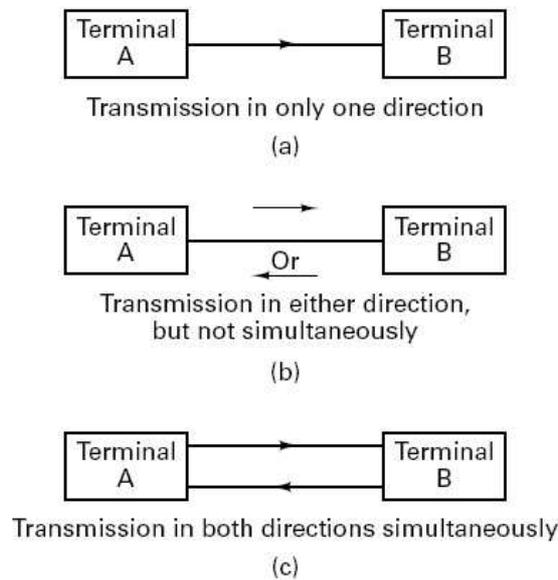


Figura 2.4: Esquemas de transmissão e recepção em sistemas de comunicação. (a) Simples, (b) Half-Duplex, (c) Full-Duplex.

Nos sistemas de telefonia celular a duplexação determina como as transmissões no *downlink* e no *uplink* compartilham os recursos de rádio. Existem dois tipos principais: Duplexação por Divisão de Frequência (FDD, do inglês *Frequency Division Duplex*) e Duplexação por Divisão do Tempo (TDD, do inglês *Time Division Duplex*). Os sistemas TDD permitem a transmissão e recepção das informações pela divisão do tempo, ou seja, o canal é particionado temporalmente para cada usuário, como observado na Fig. 2.5. Já os sistemas FDD permitem transmissão e recepção do sinal ao mesmo tempo pela divisão em frequência, ou seja, cada transmissão ocorre em uma frequência distinta, como pode ser observado na Fig. 2.5.

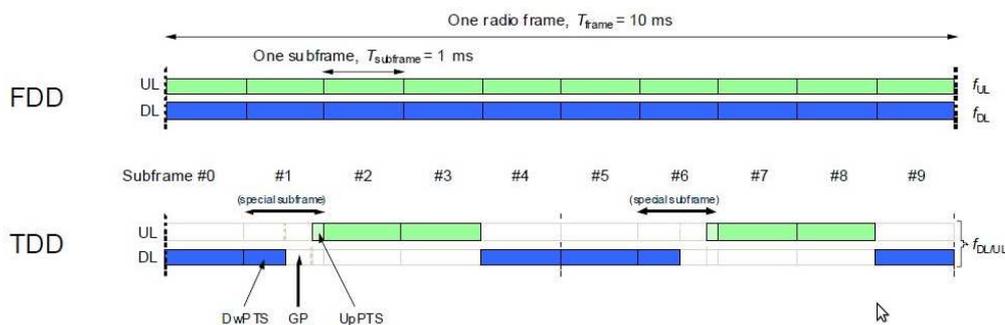


Figura 2.5: Duplexação por Divisão de Tempo e de Frequência.

Técnicas de múltiplo acesso se baseiam na divisão dos recursos do sistema entre os diversos usuários. Uma alocação eficiente dos recursos de rádio é um aspecto chave no projeto de redes de comunicação sem fio, uma vez que, em geral, tais recursos são caros e escassos. Aplicações que empregam transmissão contínua e rigorosos requisitos temporais normalmente requerem canais dedicados para assegurar uma boa qualidade de comunicação.

Canais dedicados são conseguidos por métodos de partição do canal, seja, por divisão temporal, divisão em frequência, divisão de código, divisão espacial ou ainda uma combinação desses métodos. A alocação de recursos em sistemas de transmissão em rajadas geralmente utiliza técnicas aleatórias de acesso ao meio que não garantem acessibilidade.

Em geral, a escolha de que técnica será utilizada, métodos de múltiplo acesso comum ou técnicas de acesso aleatório, dependerá das aplicações do sistema, do tráfego na rede, dos requisitos de desempenho, das características do canal e dos sistemas interferentes que operam simultaneamente. Técnicas de múltiplo acesso se dividem em Acesso Múltiplo por Divisão em Frequência (FDMA, do inglês *Frequency Division Multiple Access*), Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo (TDMA, do inglês *Time Division Multiple Access*), Acesso Múltiplo por Divisão em Código (CDMA, do inglês *Code Division Multiple Access*) e Acesso Múltiplo por Divisão Espacial (SDMA, do inglês *Space Division Multiple Access*).

No FDMA, o sinal é dividido ao longo do eixo da frequência em canais não sobrepostos onde cada usuário possui um canal de frequência diferente dos outros, como mostrado na Fig. 2.6. Esses canais possuem uma banda de guarda para compensar as imperfeições nos filtros, evitando assim a interferência com canais adjacentes. Se os canais possuem uma banda suficientemente estreita então os canais individuais não estão sujeitos ao desvanecimento seletivo em frequência. O FDMA é a técnica de múltiplo acesso utilizada na primeira geração de sistemas celulares em padrões como AMPS e ETACS.

No TDMA, o sinal é dividido ao longo do eixo temporal em canais não sobrepostos onde, para cada usuário, é alocado um *timeslot* repetido ciclicamente, como mostrado na Fig. 2.7. Estes canais ocupam toda a largura de banda do sistema que é, portanto, de banda larga. A repetição cíclica dos *timeslots* implica que a transmissão não é contínua para cada usuário. O fato de a transmissão não ser cíclica simplifica algumas funções tais como a estimação do canal, podendo esta ser feita

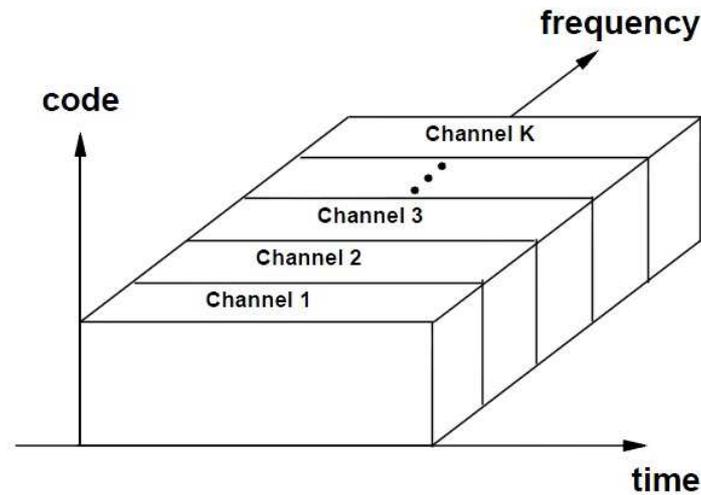


Figura 2.6: Acesso Múltiplo por Divisão em Frequência (extraído de [2]).

durante a ocupação do canal pelos *timeslots* de outros usuários. A maior dificuldade da utilização do TDMA em sistemas celulares está na *uplink*, devido à sincronização dos diferentes usuários. Além disso, erros devidos a multipercursos podem também acabar com a ortogonalidade de sistemas TDMA. Assim, canais TDMA possuem bandas de guarda para compensar erros de sincronização e multipercuso. TDMA é a técnica utilizada pelos sistemas de segunda geração, como por exemplo o GSM.

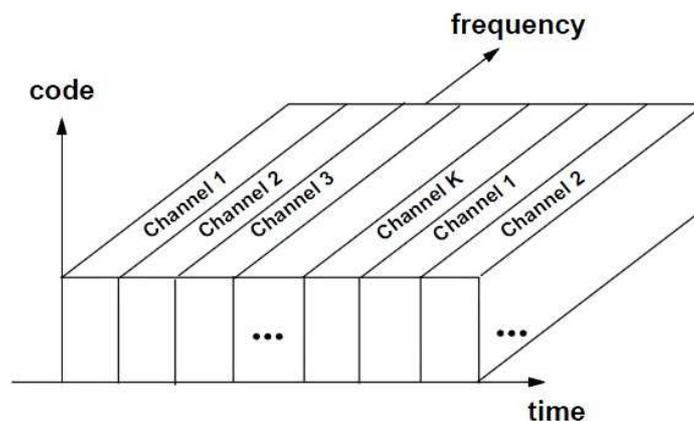


Figura 2.7: Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo (extraído de [2]).

No CDMA, as informações de cada usuário são moduladas por códigos de espalhamento. Os sinais espalhados ocupam o mesmo tempo e largura de banda, como pode ser observado na Fig. 2.8. O receptor utiliza estruturas de desespalhamento de código para separar os sinais dos diferentes usuários. Uma

das vantagens da técnica CDMA não ortogonal é que, ao contrário do FDMA e do TDMA, há uma maior flexibilidade no número de usuários, uma vez que não há necessidade de canais ortogonais. Entretanto, como códigos não ortogonais são usados, existe uma maior interferência quanto maior for o número de usuários. Os sistemas CDMA também necessitam de um controle de potência no *uplink*, pois usuários que se encontram mais próximos da estação base podem mascarar o sinal de usuários que estão mais distantes. O CDMA é a técnica utilizada pelos padrões IS-95, Acesso Múltiplo de Banda Larga por Divisão de Código (W-CDMA, do inglês *Wideband Code Division Multiple Access*) e CDMA2000.

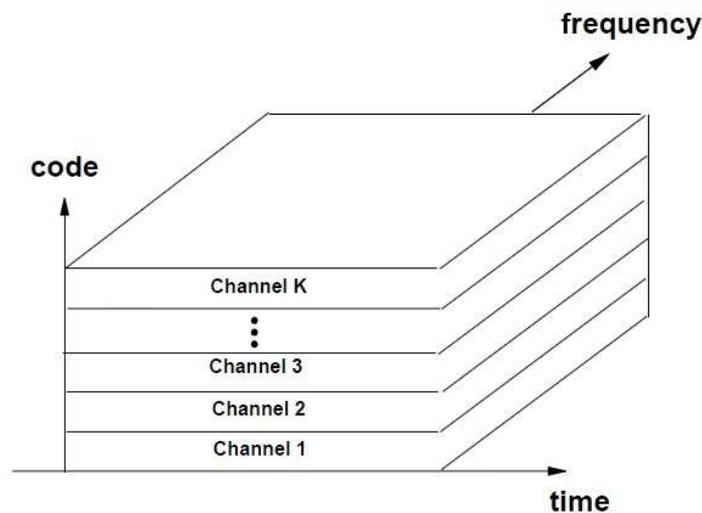


Figura 2.8: Acesso Múltiplo por Divisão em Código (extraído de [2]).

Técnicas de Acesso Múltiplo por Divisão Espacial (SDMA, do inglês *Space Division Multiple Access*) consistem em utilizar sinais descorrelacionados espacialmente (ver Fig. 2.9). Seja pela setorização da antena transmissora para direcionar a potência do sinal transmitido a uma dada região espacial, técnica conhecida como *beamforming*, seja pela utilização de múltiplas antenas transmissoras e receptoras na combinação dos símbolos do sinal, técnica conhecida pelo acrônimo MIMO, ou ainda fazendo uso de técnicas de combinação de sinais provenientes de multipercursos para obtenção de amostras descorrelacionadas do sinal com a utilização de redes cooperativas.

Técnicas de múltiplo acesso foram desenvolvidas para aplicações de tempo contínuo como voz e vídeo, onde um canal dedicado melhora bastante o desempenho do sistema. No entanto, muitos sistemas de comunicação de dados não necessitam

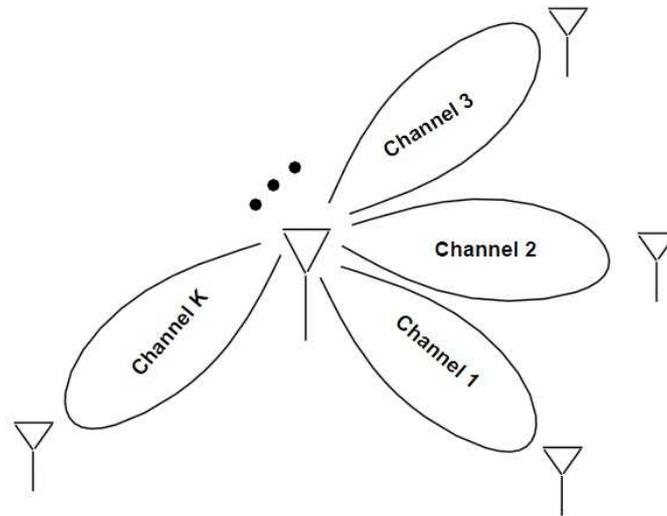


Figura 2.9: Acesso Múltiplo por Divisão no Espaço (extraído de [2]).

de transmissões em tempo contínuo, fazendo com que canais dedicados se tornem ineficientes nesses sistemas.

Assim, técnicas de acesso aleatório ao meio surgem para melhorar a eficiência de sistemas de comunicações em rajada. Tais técnicas se baseiam na alocação aleatória de recursos entre os diversos usuários. O canal é alocado de acordo com a demanda de tráfego. Se dois usuários desejam transmitir informações ao mesmo tempo, somente um dos dois obterá sucesso na alocação do canal, fazendo com que o outro usuário espere para que o canal esteja novamente liberado para transmissão. O sistema ALOHA, por exemplo, era baseado em técnicas aleatórias de acesso ao meio.

2.1.4 Técnicas de Combinação de Diversidade

Como mencionado anteriormente, diversas técnicas de múltiplo acesso podem ser utilizadas no intuito de realizar um melhor aproveitamento dos recursos de rádio. No caso particular de comunicações cooperativas, o destino realiza a combinação das amostras provenientes da fonte e dos nós *relays*.

Tal combinação pode ser feita de diversas formas, dependendo do grau de complexidade do receptor e do nível de desempenho requerido pelo sistema. Entre elas citam-se aqui ThC, SDC, MRC e EGC [7].

Na Combinação por limiar (ThC, do inglês *Threshold Combining*) os sinais recebidos são lidos em ordem sequencial e o primeiro sinal com uma Relação Sinal

Ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) maior que um limiar pré-estabelecido é selecionado. Esse sinal é usado enquanto a SNR do sinal permanece maior do que o limiar estabelecido. Quando a SNR cai abaixo desse limiar o processo de seleção é reiniciado. Note que esse método não é eficiente, pois escolhe o primeiro sinal que possui SNR acima do limiar e assim, sinais que possivelmente poderiam oferecer uma melhor SNR são descartados.

Já na Combinação de Diversidade por Seleção (SDC, do inglês *Selection Diversity Combining*) os sinais recebidos são continuamente monitorados de tal forma que o melhor sinal, ou seja, aquele que possui a maior SNR, é selecionado. A saída do combinador possui uma SNR igual à maior SNR entre todos os sinais recebidos.

Na Combinação por Razão Máxima (MRC, do inglês *Maximal-Ratio Combining*) a cada sinal é dado um ganho proporcional à razão entre a amplitude de desvanecimento e a potência de ruído. Uma vez que esses sinais são somados eles devem ter a mesma fase para maximizar o desempenho.

Diferentemente do MRC, no EGC, os pesos dados aos sinais é o mesmo, independente da qualidade do sinal. No EGC deve haver um ajuste de fase antes do somatório dos sinais. O MRC apresenta um melhor desempenho, no entanto, possui uma maior complexidade. O desempenho do EGC é inferior ao do MRC, mas sua implementação é mais simples.

2.2 Comunicações Cooperativas

Devido às novas exigências de mercado, mudanças de perfis de usuários, nova gama de aplicações e serviços, outra geração de sistemas móveis sem fio começa a despontar na atualidade. Sendo assim, os antigos requisitos atingidos pelas gerações passadas passam a não atender as necessidades de um mercado cada vez mais dinâmico e promissor.

A proliferação sem precedentes de aplicações em comunicações sem fio nos últimos anos faz com que comunicação de voz não seja mais a única aplicação de que os usuários precisam. Aplicações que requerem altas taxas de dados, tais como Internet sem fio de banda larga, jogos e TV digital têm emergido recentemente. Muitos sistemas futuros de comunicações sem fio, tais como Banda Ultra Larga Móvel (UMB, do inglês *Ultra Mobile Broadband*), Evolução a Longo Prazo (LTE, do inglês *Long Term Evolution*) e Interoperabilidade Mundial para Acesso Microonda

(WiMAX, do inglês *Worldwide Interoperability for Microwave Access*), prometem altas taxas e canais de banda larga.

Por exemplo, sistemas de quarta geração prometem taxas de 260 Mbps no *downlink* e 60 Mbps no *uplink*. Entretanto, essas taxas só podem ser alcançadas por sistemas MIMO. Mais precisamente, os usuários devem ter múltiplas antenas em seus terminais móveis, com os respectivos sinais experimentando diferentes desvanecimentos até chegar à estação base. Na prática, isso é muito difícil de ser alcançado, porque os usuários não podem ter múltiplas antenas em seus terminais de pequeno porte, devido ao *hardware* adicional. Mesmo que isso fosse possível, não haveria garantia de que os múltiplos percursos seriam totalmente descorrelacionados. Além disso, aumenta-se o custo agregado ao equipamento, que, multiplicado pelo fator de escala, levaria a custos elevados, inviabilizando assim sua utilização.

Para quebrar as barreiras impostas pela tecnologia de múltiplas antenas, deve-se pensar em novos métodos que destoam dos tradicionais sistemas de comunicação ponto-a-ponto. A visão tradicional de um sistema sem fio é a de um conjunto de terminais tentando se comunicar uns com os outros. Sob qualquer ponto de vista, entretanto, devido à natureza *broadcast* do canal sem fio, pode-se pensar que esses nós são um conjunto de antenas distribuídas na rede. Adotando esse ponto de vista, terminais em uma rede podem cooperar através da transmissão e processamento distribuídos da informação. Surge assim a idéia de cooperação.

Comunicação por cooperação consiste na criação de caminhos independentes entre a fonte e o destino pela inserção de outro canal, denominado canal *relay*, como ilustrado na Fig. 2.10. O canal *relay* pode ser visto como um canal auxiliar ao canal direto de comunicação entre a fonte e o destino [1]. Uma vez que o nó *relay* está geralmente a vários comprimentos de onda distante da fonte, o sinal que passa pelo *relay* possui uma resposta de canal totalmente descorrelacionada do sinal que trafega no *link* direto.

O novo paradigma em cooperação de usuários é que, pela implementação de um processamento adequado do sinal nos nós, múltiplos terminais possam processar o sinal recebido de outros nós e encaminhá-lo para outros. A informação retransmitida é então combinada no destino criando assim a diversidade espacial, como ilustrado na Fig. 2.11. Isso cria uma rede que pode ser vista como uma implementação distribuída do sistemas de múltiplas antenas onde a colaboração entre os nós permite a visualização de um arranjo virtual de antenas.

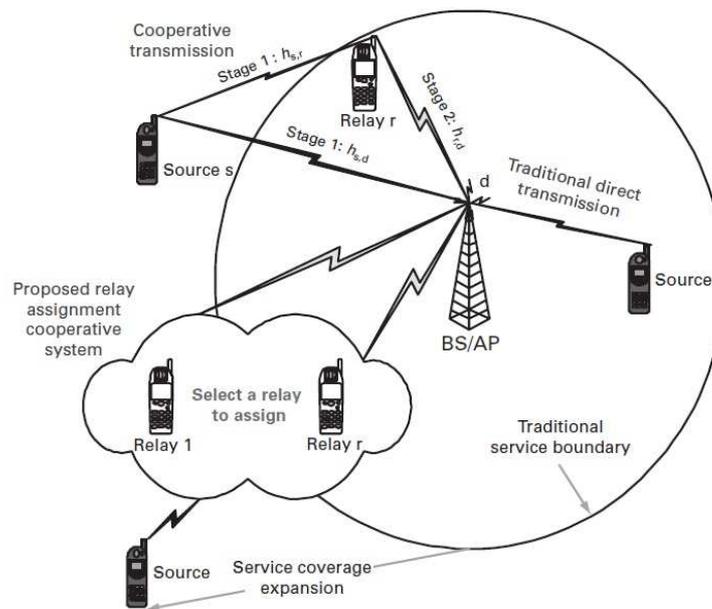


Figura 2.10: Canal *relay* (extraído de [1]).

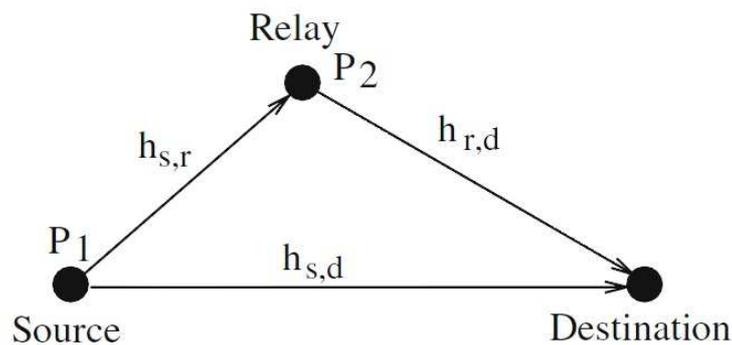


Figura 2.11: Modelo de cooperação simplificado (extraído de [1]).

O conceito de cooperação entre usuários foi pioneiramente introduzido em um artigo dividido em duas partes [8], [9]. Nesse trabalho, Sendonaris *et al.* propuseram um sistema de cooperação de dois usuários no qual cada usuário possui sua própria informação a ser enviada. Cada usuário recebe uma versão atenuada e ruidosa do sinal enviado pelo outro usuário e usa esse sinal em combinação com o seu próprio sinal para construir o sinal a ser encaminhado até o destino.

Comunicações cooperativas podem ser empregadas em diversos cenários de comunicação. Em redes celulares, limitações de capacidade, área de cobertura e interferência podem ser reduzidas pela utilização da cooperação. Em redes WLAN, técnicas de cooperação podem elevar não só *performance* como também

aumentar o alcance dos terminais. Em redes veiculares distribuídas, facilidades de comunicação podem ser alcançadas graças à cooperação. Em redes de sensores, “buracos” de cobertura podem ser cobertos graças à cooperação, mantendo-se, assim, a integridade da rede. Por essas e outras razões, comunicações cooperativas tem obtido grande interesse como nova forma de comunicação em redes sem fio.

2.2.1 Protocolos de Cooperação

O aspecto principal envolvendo comunicações cooperativas está no processamento do sinal recebido da fonte pelo nó intermediário. Os diferentes esquemas de processamento resultam em diferentes protocolos de comunicação cooperativa, que empregam não apenas diferentes processamentos no nó *relay*, mas também diferentes tipos de combinação do sinal no destino. Protocolos em comunicações cooperativas podem ser classificados em fixos e adaptativos.

Nos protocolos fixos, os recursos do canal são divididos entre a fonte e o nó intermediário (*relay*) de forma determinística. Tais protocolos têm como vantagem a baixa complexidade, mas, por outro lado, são ineficientes espectralmente. Isso porque metade dos recursos de rádio são alocados para o nó *relay*, o que reduz a vazão. Isso é um agravante quando o canal entre a fonte e o destino não é muito ruim, assim, grande parte da informação poderia ser enviada somente pela transmissão direta, fazendo com que o canal *relay* seja utilizado de forma ineficiente.

Os protocolos adaptativos tentam contornar esses problemas. Nestes protocolos, o nó *relay* decide quando transmitir ou não o sinal recebido da fonte. Tal decisão é tomada baseada em métricas que geralmente levam em consideração a SNR do sinal recebido ou na qualidade do canal entre fonte e destino.

Uma estratégia de cooperação típica pode ser modelada em duas fases ortogonais, tanto em TDMA quanto em FDMA, para evitar interferência entre as duas fases. Na primeira fase, a fonte envia informação simultaneamente para o destino e para o nó *relay*. Na segunda fase, o *relay* pode ajudar a fonte retransmitindo a informação para o destino.

A Fig. 2.11 ilustra um esquema de comunicação cooperativo genérico onde a fonte transmite com potência P_1 e o *relay* transmite com potência P_2 . Consideremos aqui o caso em que $P_1 = P_2 = P$. Na primeira fase, a fonte difunde sua informação para ambos, *relay* e destino. Os sinais recebidos $y_{s,d}$ e $y_{s,r}$ no destino e no *relay* são,

respectivamente

$$y_{s,d} = \sqrt{P}h_{s,d}x + n_{s,d} \quad (2.4)$$

$$y_{s,r} = \sqrt{P}h_{s,r}x + n_{s,r} \quad (2.5)$$

onde P é a potência de transmissão na fonte, x é o simbolo de informação transmitido, $n_{s,d}$ e $n_{s,r}$ são ruídos aditivos. Nas Eqs. (2.4) e (2.5), $h_{s,d}$ e $h_{s,r}$ são os coeficientes do canal da fonte para o destino e para o *relay*, respectivamente. Eles são modelados como variáveis aleatórias gaussianas complexas com média zero e variâncias $\delta_{s,d}^2$ e $\delta_{s,r}^2$, respectivamente. Os termos de ruído $n_{s,d}$ e $n_{s,r}$ são modelados como uma variável aleatória gaussiana complexa de média zero e variância N_o .

Na segunda fase o *relay* encaminha o sinal recebido da fonte para o destino, que pode ser modelado como

$$y_{r,d} = h_{r,d}q(y_{s,r}) + n_{r,d} \quad (2.6)$$

onde a função $q(\cdot)$ depende do processamento implementado pelo nó *relay*.

2.2.1.1 Protocolos de Cooperação Fixos

Protocolos fixos podem ser divididos em Amplifica-e-Encaminha (AF, do inglês amplify-and-forward), Decodifica-e-Encaminha (DF, do inglês decode-and-forward), Comprime-e-Encaminha (CF, do inglês compress-and-forward), Cooperação Codificada, entre outros. Neles, os recursos são divididos entre fonte e *relay* de forma determinística. Protocolos fixos possuem como vantagem a facilidade de implementação, porém, geralmente, são ineficientes espectralmente.

Amplifica-e-Encaminha (AF)

No protocolo fixo AF, o *relay* recebe o sinal da fonte e, como o nome implica, transmite uma versão amplificada deste sinal para o nó destino, como ilustrado na Fig. 2.12. O terminal destino combina apropriadamente as informações enviadas tanto pela fonte quanto também pelo nó intermediário, de forma a ter uma réplica fiel da informação original da fonte.

Embora o ruído seja amplificado pela utilização deste protocolo, o nó destino recebe duas versões descorrelacionadas do sinal transmitido e pode se beneficiar disso no processamento da informação.

O ganho de amplificação escalar, G , definirá duas subclassificações de *relays* AF: *relay* AF com ganho variável e *relay* AF com ganho fixo. Nos *relays* com ganho

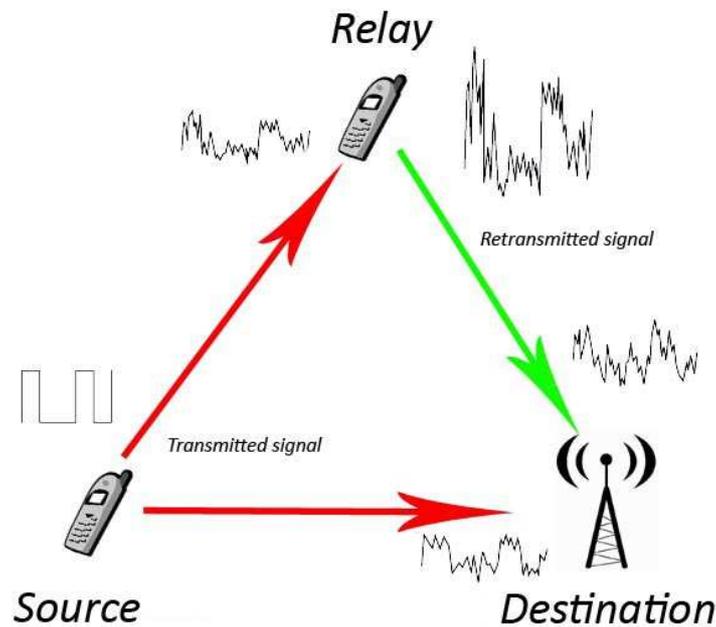


Figura 2.12: Protocolo Amplifica-e-Encaminha (extraído de [3]).

variável, o ganho escalar G é definido em função do valor instantâneo do coeficiente do canal fonte-*relay*. Já nos *relays* com ganho fixo, o ganho G é determinado em função do valor médio do coeficiente do canal fonte-*relay*.

Decodifica-e-Encaminha (DF)

Outra possibilidade de processamento para o nó *relay* é decodificar o sinal recebido pela fonte, recodificá-lo e então retransmiti-lo até o destino como pode ser visto na Fig. 2.13. A decodificação no nó *relay* pode ser feita de várias formas. O *relay* pode, por exemplo, realizar uma decodificação completa através da estimação de erros da informação enviada pela fonte, ou empregar uma decodificação símbolo a símbolo permitindo ao destino realizar a decodificação completa. Essas opções permitem um *trade-off* entre desempenho e complexidade no terminal intermediário.

Embora o caso DF fixo tenha a vantagem em relação ao caso AF de reduzir os efeitos do ruído aditivo sobre o *relay*, sua implementação possibilita a detecção errada dos sinais da fonte, com conseqüente envio de informações erradas ao destino, causando propagação de erros que podem diminuir o desempenho do sistema.

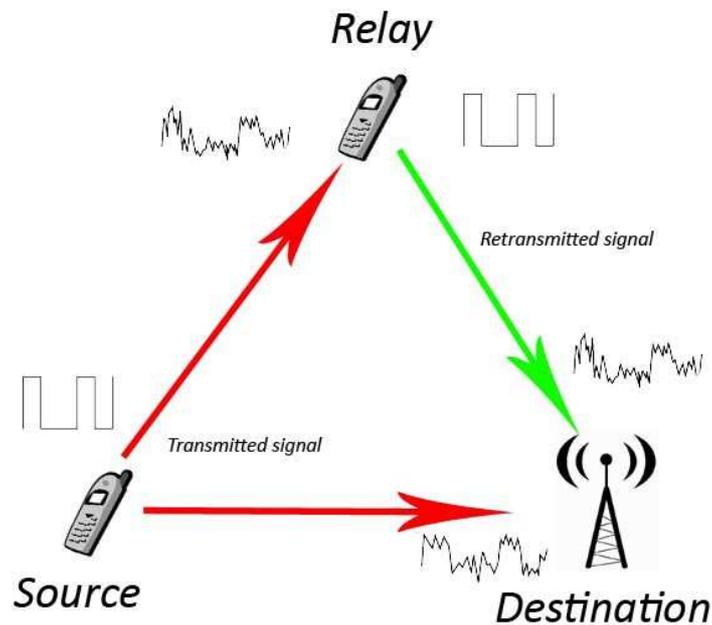


Figura 2.13: Protocolo Decodifica-e-Encaminha (extraído de [3]).

Comprime-e-Encaminha (CF)

A principal diferença entre CF e AF/DF é que nestes últimos o *relay* retransmite uma cópia da mensagem recebida, enquanto naquele o *relay* retransmite uma versão quantizada e comprimida da mensagem recebida. Portanto, o nó destino receberá e combinará o sinal proveniente da fonte e sua versão quantizada e comprimida proveniente do *relay*.

Os processos de quantização e compressão no nó intermediário são processos de codificação de fonte, ou seja, a representação de cada mensagem recebida como uma sequência de símbolos. No terminal destino, uma estimação da mensagem quantizada e comprimida é obtida pela decodificação da sequência de *bits* recebida. Essa operação de decodificação envolve o simples mapeamento dos *bits* em um conjunto de valores que estimam a mensagem transmitida. Esse mapeamento normalmente envolve a introdução de distorções que podem ser consideradas como formas de ruído.

Cooperação Codificada

Note que ambos os protocolos AF e DF são baseados em esquemas nos quais o *relay* repete os *bits* enviados pela fonte. Na cooperação codificada o *relay* envia uma

redundância incremental que, combinada no destino com a palavra-código enviada pela fonte, resulta em uma palavra-código com maior redundância [10], [11].

Enquanto em algumas palavras-código a informação e a redundância são codificadas de tal forma que só possam ser separadas através de uma completa decodificação, em outras as operações de codificação e decodificação podem ser feitas de tal forma que é possível adicionar e remover redundância da palavra-código de uma maneira simples. É esse tipo de código que é usado na cooperação codificada.

Considerando, por exemplo, o caso de uma rede celular com dois usuários, os usuários dividem seus dados em blocos nos quais é adicionado o código de Checagem de Redundância Cíclica (CRC, do inglês *Cyclic Redundancy Check*). Na cooperação codificada, os dados de cada usuário são codificados em uma palavra-código que é particionada em dois segmentos, contendo N_1 bits e N_2 bits, respectivamente. Tome-se o seguinte exemplo: considerando que a palavra-código tenha $N_1 + N_2$ bits, separando essa palavra-código em N_1 bits obtém-se a primeira partição, que é ela própria, uma palavra-código válida. O mesmo acontecendo com a segunda parte de N_2 bits.

Esses dois segmentos são chamados *frames*. Para o primeiro *frame*, cada usuário transmite uma palavra-código de N_1 -bits. Cada usuário também espera para decodificar a informação transmitida pelo outro usuário. Se a checagem do código CRC estiver correta, no segundo *frame* o usuário calcula e transmite a segunda partição de código do seu parceiro (outro usuário), contendo N_2 bits. Caso contrário, o usuário transmite sua própria segunda partição, também contendo N_2 bits. O nível de cooperação é definido com $\frac{N_2}{N}$, a percentagem do total de bits para cada bloco que o usuário transmite para seu parceiro, como ilustrado na Fig. 2.14.

A chave para a eficiência da cooperação codificada é que todo o processo é gerenciado automaticamente através do projeto de código, não necessitando de *feedback* entre os usuários. A cooperação codificada mantém a mesma vazão de dados, potência de transmissão e largura de banda (para ambos os usuários) comparada a sistemas sem cooperação. Em outras palavras, nenhum recurso adicional é necessário, não existe perda na vazão ou potência do sistema comparado ao caso não cooperativo.

Existe ainda a possibilidade de uma implementação híbrida de cooperação. Neste caso, o *relay* se comporta como regenerativo (DF, por exemplo) ou como não-regenerativo (AF) dependendo do sucesso da operação de decodificação do sinal

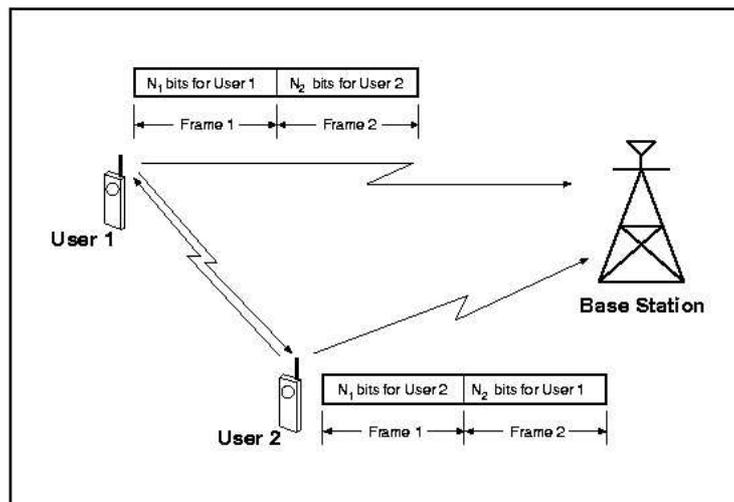


Figura 2.14: Cooperação Codificada (extraído de [3]).

proveniente da fonte. Geralmente, *relays* híbridos apresentam melhor desempenho se comparado aos outros casos (DF ou AF) separadamente.

2.2.1.2 Protocolos de Cooperação Adaptativos

Protocolos adaptativos surgiram no intuito de corrigir problemas de eficiência espectral presentes nos protocolos fixos. Além disso, eles tentam reduzir a perda de desempenho que, nos protocolos fixos, é limitado pelo pior canal (*fonte-relay* ou *relay-destino*). Exemplos de protocolos adaptativos são: *selective DF relaying* e *incremental relaying* [1].

Selective DF Relaying

No *selective DF relaying*, se a SNR do sinal recebido no nó intermediário (*relay*) excede um certo limiar, o *relay* decodifica o sinal recebido e o encaminha até o destino. Caso contrário, se o canal entre a fonte e o nó *relay* sofre um desvanecimento severo de tal forma que a SNR caia abaixo do limiar determinado, o *relay* permanece no estado *idle*. Outra possibilidade para o nó *relay* é verificar o CRC para saber se o sinal foi recebido corretamente ou não.

Selective DF relaying possui um melhor desempenho quando comparado ao DF fixo uma vez que o limiar estabelecido permite a correção do principal problema envolvendo DF fixo que é o encaminhamento de qualquer informação recebida, mesmo quando esta apresenta elevada taxa de erros.

Incremental Relaying

Se o *link* direto entre fonte e destino possui boa qualidade e o destino é capaz de receber corretamente o sinal proveniente da fonte, não há necessidade de cooperação. No *Incremental relaying*, é assumido a existência de um canal de *feedback* do destino até o *relay*. O destino envia um sinal Recepção confirmada (ACK, do inglês *Acknowledgement*) para o nó *relay* caso ele esteja apto a receber o sinal da fonte corretamente na primeira fase de transmissão, assim o *relay* não precisa encaminhar sua mensagem.

Esse protocolo possui a melhor eficiência espectral entre os protocolos descritos anteriormente. Isso porque o *relay* nem sempre precisa transmitir, e assim a segunda fase de transmissão torna-se oportunística dependendo das condições do canal direto entre a fonte e o destino.

2.2.2 Redes Multinós

Em redes multinós, duas questões principais devem ser respondidas: *Quando cooperar?* e *Com quem cooperar?*. Tais questionamentos devem ser respondidos dependendo da qualidade do canal sem fio, da densidade de terminais, das distâncias entre os nós participantes e outros parâmetros relacionados.

No intuito de responder a essas duas questões, em [12], os autores propuseram esquemas onde a seleção do *relay* é feita considerando CSI parcial na fonte e nos *relays*.

A fonte escolhe um dos *relays* disponíveis. Tal escolha é baseada em uma métrica que depende dos canais entre a fonte e o *relay* e entre o *relay* e o destino. Essa métrica é tomada de modo a minimizar a SER.

Uma vez que o melhor *relay* disponível é selecionado, a fonte realiza a decisão de cooperar ou não. Tal decisão é feita através do CSI disponível e partindo do pressuposto de que não há necessidade de cooperação se o canal entre a fonte e o destino possui uma boa qualidade.

Para decidir quando cooperar, a fonte toma a razão entre o ganho de canal fonte-destino e a métrica do *relay*, e compara a um limiar, que é denominado limiar de cooperação. Se a razão é menor que o limiar de cooperação, então a fonte decide usar apenas a transmissão direta. Caso contrário, a fonte emprega o protocolo convencional DF utilizando o *relay* já selecionado.

Diversidade de cooperação em redes multinós trazem diversos benefícios comparada a outros tipos de diversidade. Imagine, por exemplo, que se queira uma diversidade de $N + 1$. Por meio de cooperação isso seria conseguido pela utilização de N relays. Pela diversidade temporal isso seria alcançado pela repetição da informação em $N + 1$ diferentes *time slots*. No entanto, existem dois fatores que demonstram por que a diversidade de cooperação apresenta melhor desempenho em relação a diversidade temporal.

O primeiro deles é uma menor perda de propagação conseguida através dos múltiplos saltos (*multihop*) provenientes da cooperação. O outro fator é que os múltiplos nós garantem a diversidade completa, o que não é verdade no caso da diversidade temporal, uma vez que esta depende não só do número de *time slots*, mas também das características do canal como tempo de coerência, por exemplo. Diante disso, muitos fatores contribuem para a utilização da cooperação em detrimento de outros esquema de diversidade.

2.2.3 Esquemas de Seleção de Relays

No entanto, é importante salientar que existe um *tradeoff* entre ganho de diversidade e eficiência espectral quando se utilizam múltiplos relays. Se por um lado, aumentado-se o número de relays aumenta-se também o ganho de diversidade uma vez que mais caminhos independentes chegarão ao destino, por outro lado, aumentando-se o número de relays reduz-se a eficiência espectral. Assim, deve-se levar em consideração esse compromisso no projeto do sistema.

No intuito de manter a diversidade completa (*full diversity*) sem perder eficiência espectral, a seleção de relays pode ser implementada. Diversos trabalhos investigaram diferentes esquemas de seleção de nós, dentre eles, alguns merecem destaque.

Em [13], os autores propuseram um esquema de seleção oportunística (OR), de modo que o o relay selecionado seja o melhor relay em termos de CSI instantânea. Esse método é facilmente implementado, alcança diversidade completa (*full diversity*) e aumenta a eficiência espectral. No entanto, enfrenta problemas de colisão, além de ter sua complexidade elevada com o aumento do número de nós.

Em [14], o PARS (*Power Aware Relay Selection*) usa a mesma idéia do OR juntamente com restrições de potência. O objetivo principal é minimizar a potência total transmitida. Dessa forma, a interferência é reduzida e aumenta-se o tempo de

vida da rede, fazendo dele um método excelente em redes de sensores. Porém, o PARS apresenta as mesmas desvantagens do OR.

Em [15], o SENS (*Switched and Examine Node Selection*) é um esquema de seleção sub-ótimo. Nele, um *relay* arbitrário é selecionado e continua selecionado a menos que forneça um valor de SNR menor que um dado limiar. Suas vantagens são um *feedback* das informações de canal limitado e aumento da eficiência espectral, no entanto é custoso em termos de consumo de potência.

Em [16], os autores propõem um esquema de seleção baseado na posição geográfica dos *relays*. O *relay* selecionado é aquele que minimiza a taxa de erro de símbolo no destino, que é baseada numa métrica que depende da posição geográfica dos nós. Por um lado, o método é simples, possui baixo *overhead* e é robusto a cenários com desvanescimento rápido. Por outro lado, informações de posicionamento dos nós são necessárias e erros de estimação de posicionamento podem afetar o desempenho do sistema.

Em [17], foi proposto um esquema que seleciona mais de um *relay*, que implementa técnicas de *beamforming* de modo a economizar energia na transmissão das informações até o destino. Nesse esquema, apenas informações de canal entre o *relay* e o destino são necessárias, enquanto o consumo total de energia do sistema é reduzido. No entanto, o esquema precisa de sincronia entre os nós intermediários e codificação espaço-temporal.

Muitas outras técnicas podem ser empregadas no que tange a seleção do *relay*, tais como [18] e [19]. Tais técnicas são dependentes das métricas estabelecidas e de onde o processo de seleção é realizado.

2.3 Cooperação em Redes Multiusuário - Trabalhos Relacionados

Devido aos grandes benefícios provenientes da utilização de cooperação, aliados ao aumento do desempenho proveniente das redes de comunicação multiusuário, recentemente, a comunidade científica tem investido na utilização conjunta desses dois esquemas de diversidade no intuito de alcançar os requisitos dos sistemas de quarta geração. Assim, o conceito de diversidade multiusuário (MUD) aplicado a redes cooperativas tem sido objeto de grande interesse, graças aos seus resultados significativos em termos de desempenho e probabilidade de bloqueio. Diversos

trabalhos têm apresentado resultados relevantes e merecem destaque.

O conceito de diversidade multiusuário foi pioneiramente apresentado no trabalho de Knopp e Humblet [5]. Nesse trabalho, os autores consideraram o *uplink* de uma rede sem fio como um canal de múltiplo acesso. Mostrou-se que, com o intuito de maximizar a taxa de uma rede multiusuário, durante cada *time slot*, o usuário enfrentando melhores condições de canal deve transmitir e os demais devem permanecer no modo *idle*. Nesse esquema, o ganho de diversidade é devido ao fato de que um aumento no número de usuários proporciona ao sistema uma elevada probabilidade de ter um usuário com as melhores condições de canal possíveis em cada *time slot*. Entretanto, os autores supuseram que o sistema possuía acesso centralizado às informações de estado do canal (CSI) do enlace direto (*uplink*) de todos os usuários. Essa consideração torna-se difícil de justificar quando o número de usuários aumenta e a necessidade por um acesso descentralizado fica evidente. Resultados similares foram obtidos em [20] para o enlace reverso (*downlink*) como um canal de *broadcast* da estação base para o usuários móveis.

Mais recentemente, o uso combinado das diversidade multiusuário e espacial (múltiplas antenas) tem recebido grande atenção. Algumas contribuições valiosas incluem [21–24]. Entretanto, alguns trabalhos têm sugerido que a diversidade espacial, na verdade, pode mitigar as vantagens provenientes da diversidade multiusuário [21–23]. Por exemplo, em [22], os autores afirmam: “*diversidade multiusuário com nenhuma diversidade espacial apresenta melhor desempenho que esquemas que utilizam ambas as formas de diversidade.*” Intuitivamente isso pode ser explicado observando-se que a diversidade multiusuário toma vantagem do desvanecimento *riding on the peak*, que é uniformemente eliminada pela diversidade espacial. Entretanto, como observado em [25], essa conclusão é válida para esquemas de diversidade espacial *open-loop*, mas não para esquemas *closed-loop*, quando o escalonamento de usuários inerentemente requer *feedback*.

Embora a utilização de diversidade espacial com o emprego de múltiplas antenas em sistemas multiusuário tenha sido largamente abordada nesses trabalhos, a diversidade espacial proveniente de cooperação aplicada a redes multiusuários foi abordada apenas recentemente em [26–32]. Em [26], os autores estudaram a união das diversidades de cooperação e multiusuário em um ambiente descentralizado com ênfase no aumento da taxa do sistema. A capacidade de redes cooperativas explorando diversidade multiusuário foi discutida em [27, 28].

Em [29], os autores investigaram o impacto da diversidade multiusuário no desempenho de redes multiusuário sem fio cooperativas de dois saltos. Tal cenário foi estendido para o caso multi-*relay* [30], onde expressões assintóticas para a probabilidade de *outage* e taxa de erro de símbolo foram deduzidas e indicaram que tanto o número de fontes quanto de *relays* disponíveis têm impacto significativo no desempenho do sistema.

Em [31], Sun *et al.* propuseram um esquema de seleção conjunta no qual o melhor par fonte-*relay* é selecionado para comunicação. Entretanto, o esquema de seleção conjunta proposto tem a necessidade de estar continuamente estimando o canal. Mais recentemente, no intuito de reduzir a complexidade do sistema em [31] e ainda assim, alcançar a mesma ordem de diversidade, Ding *et al.* [32] propuseram um esquema de seleção fonte-*relay* que alcançou *performance* de *outage* comparável àquela utilizando o esquema de seleção conjunta.

Capítulo 3

Redes Cooperativas Multiusuário com Múltiplos *Relays*: Proposta de um Esquema de Seleção Eficiente e de Baixa Complexidade

Neste capítulo, é proposto um esquema de seleção eficiente e de baixa complexidade a ser empregado em redes cooperativas multiusuário com múltiplos *relays*. De forma a avaliar o desempenho e a confiabilidade do esquema proposto, este será comparado ao esquema de seleção ótimo [31] através da análise da probabilidade de *outage*. Considerando três protocolos de cooperação, expressões em forma fechada para a probabilidade de *outage* são obtidas e validadas por meio de simulação de Monte Carlo.

Com o intuito de realizar uma análise mais aprofundada do comportamento de *outage* em função das variáveis do modelo, é realizada uma análise assintótica de modo a determinar a ordem de diversidade. Ao longo desse capítulo, serão apresentadas e discutidas as vantagens e desvantagens do esquema de seleção proposto em relação ao esquema ótimo. Dessa maneira, será possível comprovar a validade do esquema e concluir em que cenários ele está mais apto a ser utilizado.

É importante salientar que embora o esquema de seleção conjunta (ótimo) [31] seja aquele que apresenta melhor desempenho em termos da probabilidade de *outage*, este esquema possui algumas desvantagens, tais como o elevado número

de estimações de canal e comparações de *links*, além de só poder ser implementado de forma centralizada, o que pode inviabilizar sua utilização em alguns cenários. Essas características fazem com que o esquema de seleção ótimo seja classificado como um esquema de alta complexidade. Por isso, propõe-se um método eficiente e de baixa complexidade de seleção de nós e que possa ser implementado de forma tanto centralizada quanto distribuída.

3.1 Modelo Sistemico

Neste trabalho, considerou-se uma rede cooperativa multi-*relay* multiusuário composta de um nó fonte S , N relays R_n ($n = 1, \dots, N$) e L nós destinos D_l ($l = 1, \dots, L$), como mostrado na Fig. 3.1. Todos os nós operam no modo *half-duplex* e considera-se o esquema de acesso múltiplo por divisão no tempo (TDMA). Os canais pertencendo a cada percurso sofrem desvanecimento Rayleigh plano independente [2] não necessariamente identicamente distribuído. Além disso, os canais permanecem constantes durante cada processo de comunicação (*block fading*).

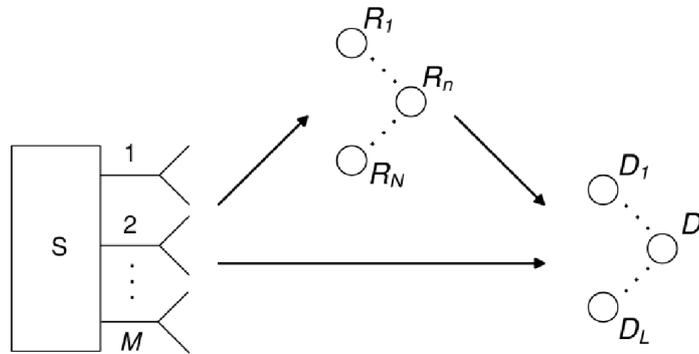


Figura 3.1: Modelo sistêmico a ser analisado.

Em sistemas práticos multi-*relay* multiusuário, como por exemplo, o *downlink* de redes de telefonia celular, a fonte (estação base) geralmente está localizada em uma posição elevada em relação aos terminais móveis, no intuito de aumentar a cobertura de área e melhorar a qualidade de transmissão. Portanto, a qualidade dos *links* diretos fonte-destino são geralmente muito bons e podem ser utilizados eficientemente no projeto do sistema. Por essa razão, no modelo sistêmico analisado, os *links* diretos entre a fonte e os destinos são considerados.

Três protocolos de cooperação são empregados: DF, AF com ganho variável (AF_{VG}) e AF com ganho fixo (AF_{FG}). Duas configurações de antenas são empregadas. Na primeira, a fonte está equipada com uma única antena. Já na segunda, a fonte é equipada com M antenas transmissoras e emprega técnicas de formatação de feixe (*beamforming*). Em ambas as configurações, todos os nós *relays* e destinos possuem uma única antena.

3.2 Esquema de Seleção Proposto

Um padrão que se observa a cada nova geração de redes sem fio é que há um aumento considerável na taxa e na densidade dos terminais móveis constituintes da rede. Assim, desde a primeira geração, muitas melhorias foram implementadas no intuito de realizar um aproveitamento mais eficiente dos recursos. Como descrito anteriormente, redes de cooperação surgiram no intuito de se beneficiar das melhorias trazidas pela tecnologia MIMO em redes onde a aplicação desta era inviável.

No contexto de multinós, mostrou-se que a seleção de terminais pode manter o ganho de diversidade sem, contudo, apresentar grandes perdas em termos de eficiência espectral. Assim, a aliança entre comunicações cooperativas aplicadas a redes multiusuário constitui um ramo em rápido crescimento. Dessa forma, em [31], um esquema de seleção conjunta (ótimo) foi proposto, apresentando níveis elevados de desempenho em termos da probabilidade de *outage*. No entanto, esse esquema apresenta algumas desvantagens. Uma delas é o elevado número de estimativas e comparações de CSI que esse esquema requer, fazendo dele uma alternativa custosa em redes de elevada densidade.

Dito isto, nessa Dissertação foi proposto um esquema de seleção que apresenta um desempenho subótimo enquanto reduz consideravelmente o número de estimativas e comparações a serem realizadas. Além disso, como será descrito a seguir, o esquema proposto pode ser implementado de forma distribuída, o que não acontece para o esquema de seleção conjunta. Assim, o esquema proposto constitui-se numa boa alternativa ao esquema ótimo nas novas gerações de redes sem fio, que requerem alta taxa de dados e apresentam elevada densidade de nós. O esquema proposto é descrito na sequência.

Antes que o processo de comunicação se inicie, um dentre os L destinos (chamado aqui de D^*) e um dentre os N relays (chamado aqui de R^*) são selecionados para participar do processo de comunicação. O esquema de seleção é dividido em duas

etapas. Na primeira etapa, o melhor destino é selecionado baseando-se na qualidade do *link* direto entre todos os destinos e a fonte, ou seja,

$$D^* = \arg \max_l [\gamma_{SD_l}], \quad (3.1)$$

na qual $\gamma_{SD_l} = |h_{SD_l}|^2 d_{SD_l}^{-\rho} E_S / N_0$, com h_{SD_l} sendo o coeficiente de canal entre a fonte e o l -ésimo destino, E_S é a energia média por símbolo na fonte, d_{SD_l} é a distância entre S e D_l , ρ é o coeficiente de perda de percurso e N_0 é a densidade espectral de potência do ruído. Na segunda etapa, uma vez que o melhor destino é selecionado, o melhor *relay* R^* será selecionado como sendo aquele que maximizará a relação sinal-ruído fim-a-fim entre a fonte e o destino selecionado. Mais especificamente, no caso do *relay* DF [33]

$$R_{\text{DF}}^* = \arg \max_n [\min [\gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D^*}]], \quad (3.2)$$

para o caso AF com ganho variável, [34]

$$R_{\text{AFVG}}^* = \arg \max_n \left[\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D^*}} \right], \quad (3.3)$$

e para o caso AF com ganho fixo, [34]

$$R_{\text{AFFG}}^* = \arg \max_n \left[\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{C + \gamma_{R_n D^*}} \right], \quad (3.4)$$

nas quais $C = 1/G^2 N_0$ [34], com G sendo o ganho escalar aplicado no *relay*, $\gamma_{SR_n} = |h_{SR_n}|^2 d_{SR_n}^{-\rho} E_S / N_0$, $\gamma_{R_n D^*} = |h_{R_n D^*}|^2 d_{R_n D^*}^{-\rho} E_R / N_0$, $\gamma_{R_n D^*} = |h_{R_n D^*}|^2 d_{R_n D^*}^{-\rho} E_R / N_0$, h_{SR_n} denota o coeficiente de canal entre a fonte e o n -ésimo *relay*, $h_{R_n D^*}$ representa o coeficiente de canal entre o n -ésimo *relay* e o destino selecionado, d_{SR_n} e $d_{R_n D^*}$ são as distâncias entre S e R_n , e entre R_n e D^* , respectivamente, e E_R é a energia média por símbolo no n -ésimo *relay*.

As Eqs. (3.2), (3.3) e (3.4) podem ser obtidas a partir do modelo de transmissão descrito nas seções posteriores.

3.3 Vantagens e Desvantagens do Esquema de Seleção Proposto

Nesta seção, serão apresentadas as vantagens e desvantagens do esquema de seleção proposto.

3.3.1 Vantagens

- O esquema de seleção proposto pode ser implementado tanto de maneira centralizada quanto distribuída, enquanto que o esquema de seleção ótimo requer implementação de forma centralizada. Baseando-se em [13, 35], o esquema de seleção proposto pode ser implementado de forma distribuída utilizando a estratégia dos temporizadores distribuídos da seguinte forma:

Seleção de D^* : Primeiramente, a fonte S envia uma Mensagem de Requisição de Seleção de Destino (DSRM, do inglês *Destination Selection Request Message*), que indica a requisição para o início da seleção do destino. Essa mensagem é recebida por todos os destinos D_l ($l = 1, \dots, L$). “Escutando” DSRM, todos os *relays* R_n ($n = 1, \dots, N$) são capazes de estimar seus respectivos ganhos de canal $|h_{SR_n}|^2$ para a fonte, que serão utilizados na sequência para seleção distribuída do *relay*. Já os destinos, estimando seus ganhos de canal direto $|h_{SD_l}|^2$ baseado na DSRM, iniciam seus respectivos *timers* e desempenham a seleção de destino distribuída [13]. O *timer* é inversamente proporcional ao ganho de canal. Assim, o destino com melhor ganho de canal terá seu *timer* menor e uma vez que esse *timer* expirar, tal destino envia uma Mensagem de Reconhecimento de Seleção de Destino (DSAM, do inglês *Destination Selection Acknowledge Message*) para identificar sua presença. “Escutando” tal mensagem, todos os outros destinos zeram seus *timers* e passam ao modo *idle*, reconhecendo que outro destino já foi selecionado. A DSAM é recebida tanto pela fonte quanto pelos *relays* R_n .

Seleção de R^* : Uma vez que os *relays* receberam ambas DSRM e DSAM, cada um deles é capaz de calcular seus respectivos ganhos de canal para a fonte $|h_{SR_n}|^2$ e para o destino selecionado $|h_{R_n D^*}|^2$. Assim, os *relays* calculam suas correspondentes SNRs fim a fim de acordo com o protocolo de cooperação empregado. Ou seja, $\min(\gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D^*})$ para o caso DF, $\left(\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D^*}}\right)$ para o caso AF_{VG} e $\left(\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{C + \gamma_{R_n D^*}}\right)$ para o caso AF_{FG}. Em seguida, essas

SNRs são utilizadas para iniciar os respectivos *timers*. Conseqüentemente, o *relay* com a maior SNR fim a fim terá seu *timer* expirado primeiro e será o *relay* selecionado. Tal *relay* R^* , envia uma Mensagem de Requisição de Seleção de *relay* (RSAM, do inglês *Relay Selection Acknowledge Message*) para identificar sua presença. “Escutando” tal mensagem os outros *relays* zeram seus respectivos *timers* e passam ao estado *idle*.

Dessa forma, o esquema de seleção proposto pode ser implementado de forma distribuída, o que não requer um extenso conhecimento do CSI. Especificamente, os *relays* não necessitam do CSI do *link* direto e a (os) fonte (destinos) não necessita(m) do CSI dos (da) destinos (fonte) para os *relays*. Assim, esse esquema adquire a característica de baixa complexidade.

- Além disso, tal esquema não só reduz drasticamente a quantidade de estimativas de canal (CSI) necessárias, como também a quantidade de comparações de canais em relação ao esquema de seleção conjunta. Mais especificamente, considerando que todos os nós possuem uma única antena, a quantidade de CSI necessária pelo esquema proposto seria $L + 2N$, enquanto para o esquema de seleção conjunta seria $LN + L + N$. Quanto à quantidade de comparações de canais, no esquema proposto seriam necessárias $L + N$ comparações, enquanto que para o esquema de seleção conjunta seriam necessárias $L(N + 1)$. Em redes de alta densidade, característica presente nas futuras gerações de redes sem fio, isso pode reduzir consideravelmente a sobrecarga (*overhead*) da rede.

Por exemplo, em uma rede cooperativa multi-*relay* multiusuário de larga escala, digamos, $N = L = 100$, a quantidade de estimativas de canal e potenciais comparações entre *links* são 10200 e 10100, respectivamente, caso o esquema de seleção conjunta fosse empregado, enquanto que para o esquema de seleção proposto, esses números seriam reduzidos a 300 e 200, respectivamente. Isso mostra a grande aplicabilidade do esquema proposto em relação ao esquema de seleção conjunta em redes de larga escala.

Em comparação ao esquema de seleção ótimo, o esquema proposto apresenta:

- Probabilidade de bloqueio próxima;
- Mesma ordem de diversidade;

- Complexidade reduzida.

3.3.2 Desvantagens

- A grande desvantagem do esquema proposto é a seleção apenas do melhor destino entre L possíveis. Embora essa seja uma estratégia apresentada em [5] de forma a maximizar a taxa em redes multiusuário, tal estratégia pode fazer com que destinos com qualidade defasada de canal nunca recebam os recursos, tornando o sistema injusto na alocação do canal entre os usuários.
- Uma outra desvantagem do esquema de seleção proposto é a necessidade da existência dos *links* diretos (fonte-destino), ou seja, caso o destino não esteja ao alcance da fonte, o esquema de seleção não pode ser implementado, uma vez que a seleção do melhor destino é feita com base nos *links* diretos. Além disso, a seleção do melhor *relay* não poderia ser implementada, uma vez que esta é totalmente dependente da seleção do melhor destino, como descrito anteriormente.

3.4 Modelo de transmissão considerando a fonte equipada com uma única antena

Após a utilização do esquema de seleção proposto, *relay* e destino foram selecionados e, assim, o processo de comunicação é realizado em duas fases que dependem do protocolo de cooperação aplicado.

3.4.1 Decodifica-e-Encaminha (DF)

Na primeira fase, o nó fonte transmite a informação tanto para o *relay* quanto para o destino selecionados (*broadcast*), de tal forma que os sinais recebidos por ambos os nós são dados, respectivamente, por

$$y_{SR^*} = \sqrt{E_S d_{SR^*}^{-\rho}} h_{SR^*} x + n_{SR^*}, \quad y_{SD^*} = \sqrt{E_S d_{SD^*}^{-\rho}} h_{SD^*} x + n_{SD^*}. \quad (3.5)$$

Sem perda de generalidade, considera-se aqui que todos os sinais de ruído branco aditivo gaussiano (AWGN) n_{XY} ($X \in \{S, R^*\}$, $Y \in \{R^*, D^*\}$) tem densidade espectral de potência média N_0 .

Na segunda fase, assumindo que o *relay* selecionado está sempre apto a decodificar corretamente o sinal recebido, ele reenvia o sinal decodificado para o destino selecionado. Assim, o sinal recebido pelo destino na segunda fase da transmissão é dado por

$$y_{R^*D^*}^{\text{DF}} = \sqrt{E_R d_{R^*D^*}^{-\rho}} h_{R^*D^*} x + n_{R^*D^*}. \quad (3.6)$$

3.4.2 Amplifica-e-Encaminha (AF)

Na primeira fase, os sinais recebidos por ambos o *relay* e o destino selecionados podem ser, respectivamente, escritos como em (3.5). Na segunda fase, o sinal recebido pelo destino proveniente do *relay* é dado por

$$y_{R^*D^*}^{\text{AF}} = \sqrt{E_R d_{R^*D^*}^{-\rho}} h_{R^*D^*} G \underbrace{\left(\sqrt{E_S d_{SR^*}^{-\rho}} h_{SR^*} x + n_{SR^*} \right)}_{y_{SR^*}} + n_{R^*D^*}. \quad (3.7)$$

Dependendo de como o ganho escalar G é definido, os relays AF podem ser classificados em duas categorias, denominadas *relay* AF com ganho variável e *relay* AF com ganho fixo.

Nos *relays* com ganho variável, os nós intermediários possuem informação completa do canal (*full CSI*). Assim, o ganho escalar G é definido em função da informação instantânea do canal. Embora apresentem melhores resultados, a complexidade desses *relays* é maior, uma vez que precisam estar constantemente estimando as condições de canal.

De modo a reduzir a complexidade dos nós intermediários, propôs-se definir o ganho G baseando-se em informações estatísticas das condições do canal (*statistical CSI*). Assim, os *relays* com ganho fixo estimam o canal de tempos em tempos e extraem informações estatísticas do canal com o intuito de calcular o ganho G . Dessa forma, reduz-se a quantidade de estimações do canal e, conseqüentemente, a complexidade dos nós intermediários.

Uma vez que as duas fases de transmissão estejam finalizadas, o destino, de posse dos sinais provenientes da fonte e do *relay*, realiza a combinação dos dois sinais. Com o intuito de reduzir a complexidade do nó destino e simplificar a análise, considerou-se a utilização da Combinação de Diversidade por Seleção (SDC, do inglês

Selection Diversity Combining). Essa estratégia apresenta resultados piores quando comparada à técnica MRC. Entretanto, a SDC é menos complexa que a MRC, o que é uma característica desejável nos dispositivos móveis de redes celulares convencionais. Nesse caso, apenas o sinal com maior SNR instantânea será selecionado de tal forma a SNR fim a fim para os três tipos de *relay* é dada por

$$\gamma_{\text{end}}^{\text{DF}} = \max \left[\max_l [\gamma_{SD_l}], \max_n [\min [\gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D^*}]] \right], \quad (3.8)$$

$$\gamma_{\text{end}}^{\text{AFVG}} = \max \left[\max_l [\gamma_{SD_l}], \max_n \left[\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D^*}} \right] \right], \quad (3.9)$$

e

$$\gamma_{\text{end}}^{\text{AFFG}} = \max \left[\max_l [\gamma_{SD_l}], \max_n \left[\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{C + \gamma_{R_n D^*}} \right] \right]. \quad (3.10)$$

Caso o esquema de seleção ótimo fosse empregado, as Eqs. (3.8), (3.9) e (3.10) seriam reescritas substituindo D^* por D_l .

3.5 Modelo de transmissão considerando a fonte equipada com múltiplas antenas

O modelo sistêmico representado pela Fig. 3.1 pode ser aplicado a diversas configurações de redes sem fio. Por exemplo, considerando uma rede celular, a fonte poderia ser vista como uma estação-base e os N *relays* e os L destinos como terminais de usuários móveis.

Essa configuração permite que a fonte esteja equipada com múltiplas antenas uma vez que as limitações de complexidade e espaço físico são facilmente contornadas. Assim, considerando um modelo de sistema no qual a fonte está equipada com M antenas transmissoras, os sinais recebidos tanto pelo *relay* quanto pelo destino podem ser, respectivamente, escritos como

$$y_{SR^*} = \sqrt{E_{SD}^{-\rho}} \mathbf{h}_{SR^*}^\dagger \mathbf{w}_{SR^*} x + n_{SR^*}, \quad y_{SD^*} = \sqrt{E_{SD}^{-\rho}} \mathbf{h}_{SD^*}^\dagger \mathbf{w}_{SD^*} x + n_{SD^*}, \quad (3.11)$$

nas quais \mathbf{w}_{SR^*} e \mathbf{w}_{SD^*} denotam os vetores de transmissão *beamforming* $M \times 1$ de S para R^* e de S para D^* , respectivamente, \mathbf{h}_{SR^*} e \mathbf{h}_{SD^*} representam os vetores

$M \times 1$ entre S e R^* , e entre S e D^* , respectivamente, onde cada coeficiente apresenta desvanecimento Rayleigh e $(\cdot)^\dagger$ simboliza o operador transposto conjugado.

Como apresentado em [36], os vetores ótimos \mathbf{w}_{SR^*} e \mathbf{w}_{SD^*} que maximizam as SNRs recebidas tanto no *relay* quanto no destino são dados, respectivamente, por $\mathbf{w}_{SR^*} = \frac{\mathbf{h}_{SR^*}}{\|\mathbf{h}_{SR^*}\|_F}$ e $\mathbf{w}_{SD^*} = \frac{\mathbf{h}_{SD^*}}{\|\mathbf{h}_{SD^*}\|_F}$, onde $\|\cdot\|_F$ é a norma de Frobenius. Na segunda fase, o sinal recebido pelo nó destino selecionado é o mesmo que em (3.6) e (3.7), e a SNR fim a fim pode ser escrita como (3.8), (3.9) e (3.10) para os respectivos protocolos de *relay* analisados, mas agora $\gamma_{SD_l} = \|\mathbf{h}_{SD_l}\|_F^2 d_{SD_l}^{-\rho} E_S/N_0$ and $\gamma_{SR_n} = \|\mathbf{h}_{SR_n}\|_F^2 d_{SR_n}^{-\rho} E_S/N_0$.

De (3.11), pode-se observar que existem dois diferentes vetores \mathbf{w}_{SR^*} e \mathbf{w}_{SD^*} . Uma vez que a fonte não pode usar simultaneamente dois vetores de peso, a fase de *broadcast* (fase I da transmissão) requer agora um *slot* de tempo adicional quando comparado ao caso de fonte com uma única antena. Isso quer dizer que todo o processo de transmissão para o caso de fonte com múltiplas antenas possui uma eficiência espectral pior do que o caso com uma única antena. Por outro lado, ele apresenta um melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio, como será visto a seguir, comprovando a utilidade de a fonte possuir múltiplas antenas. Em outras palavras, existe um compromisso entre eficiência espectral e probabilidade de bloqueio que deve ser levado em consideração no projeto do sistema.

3.6 Análise de Desempenho - Probabilidade de Bloqueio

A probabilidade de bloqueio é definida como a probabilidade de que a SNR fim a fim esteja abaixo de algum limite predefinido γ_{th} . Esse limite é um valor de proteção para a SNR, acima do qual a qualidade de serviço (QoS) é considerada satisfatória. Caso a SNR fim a fim esteja abaixo desse valor, o processo de comunicação fica comprometido e diz-se que houve um bloqueio (*outage*). Assim, matematicamente, a probabilidade de bloqueio pode ser definida como

$$P_{out} = \Pr(\gamma_{end} < \gamma_{th}), \quad (3.12)$$

na qual $\Pr(\cdot)$ denota probabilidade. O desempenho do esquema de seleção proposto será avaliado e comparado com o esquema de seleção ótimo em termos da probabilidade de *outage*. Para tal, serão desenvolvidas e determinadas as expressões da probabilidade de bloqueio para três diferentes protocolos de cooperação no *relay*:

decodifica-e-encaminha (DF), amplifica-e-encaminha com ganho variável (AF_{VG}) e amplifica-e-encaminha com ganho fixo (AF_{FG}).

As deduções serão realizadas considerando o caso no qual a fonte é equipada com M múltiplas antenas, porém o caso de fonte equipada com uma única antena pode ser obtido fazendo-se $M = 1$.

3.6.1 Decodifica-e-encaminha (DF)

Dada a independência dos links entre os nós, garantida pelas condições previamente estabelecidas, e de posse da Eq. (3.8), a probabilidade de bloqueio para o caso DF pode ser matematicamente definida como

$$P_{\text{out}}^{\text{DF}} = \Pr(\gamma_{\text{end}} < \gamma_{\text{th}}) = \Pr\left(\max_l [\gamma_{SD_l}] < \gamma_{\text{th}}\right) \times \underbrace{\Pr\left(\max_n [\min[\gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D^*}]] < \gamma_{\text{th}}\right)}_{\Psi}, \quad (3.13)$$

na qual $\Pr(\max_l [\gamma_{SD_l}] < \gamma_{\text{th}})$ é dado por

$$\Pr\left(\max_l [\gamma_{SD_l}] < \gamma_{\text{th}}\right) = \prod_{l=1}^L \Pr(\gamma_{SD_l} < \gamma_{\text{th}}) \stackrel{(a)}{=} \prod_{l=1}^L \left[1 - \frac{\Gamma(M, \gamma_{\text{th}} \lambda_{SD_l})}{\Gamma(M)}\right], \quad (3.14)$$

e $\lambda_{SD_l} \triangleq 1/E\{\gamma_{SD_l}\}$, com $E\{\cdot\}$ denotando o operador esperança, $\Gamma(\cdot)$ e $\Gamma(\cdot, \cdot)$ são a função gamma [37, Eq. (8.310.1)] e a função superior gamma incompleta [37, Eq. (8.350.2)], respectivamente, e o passo (a) é devido às SNRs dos *links* seguirem a distribuição gamma. Então, de acordo com o teorema da probabilidade total [38], Ψ em (3.13) pode ser reescrito como

$$\Psi = \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \underbrace{\Pr\left(\max_n [\min[\gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D_l}]] < \gamma_{\text{th}}\right)}_{\Phi}, \quad (3.15)$$

na qual Φ pode ser expresso como

$$\Phi = \prod_{n=1}^N \left[F_{\gamma_{SR_n}}(\gamma_{\text{th}}) + F_{\gamma_{R_n D_l}}(\gamma_{\text{th}}) - F_{\gamma_{SR_n}}(\gamma_{\text{th}}) F_{\gamma_{R_n D_l}}(\gamma_{\text{th}}) \right], \quad (3.16)$$

na qual $F_{\gamma_{SR_n}}(\gamma_{\text{th}}) = 1 - \Gamma(M, \gamma_{\text{th}} \lambda_{SR_n})/\Gamma(M)$, com $\lambda_{SR_n} \triangleq 1/E\{\gamma_{SR_n}\}$ e $F_{\gamma_{R_n D_l}}(\gamma_{\text{th}}) = 1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \lambda_{R_n D_l}}$, com $\lambda_{R_n D_l} \triangleq 1/E\{\gamma_{R_n D_l}\}$. Usando os resultados

apresentados em [32, App.], $\Pr(D^* = D_l)$ pode ser calculada como

$$\Pr(D^* = D_l) = 1 + \sum_{k=1}^{L-1} \sum_{\substack{A_k \subseteq \{1,2,\dots,l-1,l+1,\dots,L\} \\ |A_k|=k}} (-1)^k \frac{\lambda_{SD_l}}{\lambda_{SD_l} + \sum_{j \in A_k} \lambda_{SD_j}}. \quad (3.17)$$

Finalmente, substituindo (3.16) e (3.17) em (3.15) e ajustando esta última e (3.14) em (3.13), uma expressão fechada para a probabilidade de *outage* para o protocolo de cooperação DF pode ser obtida como

$$P_{\text{out}}^{\text{DF}} = \prod_{l=1}^L \left[1 - \frac{\Gamma(M, \gamma_{\text{th}} \lambda_{SD_l})}{\Gamma(M)} \right] \sum_{l=1}^L \overbrace{\left(1 + \sum_{k=1}^{L-1} \sum_{\substack{A_k \subseteq \{1,2,\dots,l-1,l+1,\dots,L\} \\ |A_k|=k}} (-1)^k \frac{\lambda_{SD_l}}{\lambda_{SD_l} + \sum_{j \in A_k} \lambda_{SD_j}} \right)}^{\Xi} \\ \times \prod_{n=1}^N \left\{ \left[1 - \frac{\Gamma(M, \gamma_{\text{th}} \lambda_{SR_n})}{\Gamma(M)} \right] + (1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \lambda_{R_n D_l}}) - \left[1 - \frac{\Gamma(M, \gamma_{\text{th}} \lambda_{SR_n})}{\Gamma(M)} \right] (1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \lambda_{R_n D_l}}) \right\}. \quad (3.18)$$

À primeira vista a Eq. (3.18) aparenta ser bastante complexa, no entanto, de uma análise mais profunda observa-se que tal equação é constituída de operações matemáticas elementares e que podem ser implementadas facilmente utilizando-se simuladores numéricos apropriados.

3.6.2 Amplifica-e-encaminha com ganho variável (AF_{VG})

De (3.9), a probabilidade de outage para o caso de cooperação AF com ganho variável pode ser escrita como

$$P_{\text{out}}^{\text{AFVG}} = \Pr(\gamma_{\text{end}} < \gamma_{\text{th}}) = \Pr\left(\max_l [\gamma_{SD_l}] < \gamma_{\text{th}}\right) \times \underbrace{\Pr\left(\max_n \left[\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D^*}} \right] < \gamma_{\text{th}}\right)}_{\Omega}, \quad (3.19)$$

onde $\Pr(\max_l [\gamma_{SD_l}] < \gamma_{th})$ é o mesmo que em (3.14). Assim, Ω pode ser reescrito como

$$\Omega = \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \times \prod_{n=1}^N \underbrace{\Pr\left(\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D_l}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D_l}} < \gamma_{th}\right)}_{\Upsilon}, \quad (3.20)$$

na qual Υ é dado por

$$\Upsilon = \int_0^{\infty} \Pr\left[\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D_l}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D_l}} < \gamma_{th}\right] f_{\gamma_{SR_n}}(\gamma_{SR_n}) d\gamma_{SR_n}. \quad (3.21)$$

Uma vez que a fonte possui múltiplas antenas, tem-se que

$$f_{\gamma_{SR_n}}(\gamma_{SR_n}) = \frac{\gamma_{SR_n}^{M-1} \lambda_{SR_n}^M}{\Gamma(M)} e^{-\gamma_{th} \lambda_{SR_n}}. \quad (3.22)$$

Com a ajuda de [37, Eqs. (3.351.2) e (3.471.9)] e fazendo uso da expansão binomial em [37, Eq. (1.111)], a integral em (3.21) pode ser simplificada após algumas manipulações algébricas, reduzindo-se à

$$\Upsilon = 1 - \frac{\lambda_{SR_n}^M e^{-\gamma_{th}(\lambda_{SR_n} + \lambda_{R_n D_l})}}{\Gamma(M)} \sum_{k=0}^{M-1} 2\gamma_{th}^{M-k-1} \binom{M-1}{k} \left[\frac{(\gamma_{th} + 1)\gamma_{th} \lambda_{R_n D_l}}{\lambda_{SR_n}} \right]^{\frac{k+1}{2}} K_{k+1}(\beta), \quad (3.23)$$

na qual $\beta = 2\sqrt{(\gamma_{th} + 1)\gamma_{th} \lambda_{R_n D_l} \lambda_{SR_n}}$ e $K_n(\cdot)$ denota a função de Bessel modificada de n -ésima ordem de segundo tipo [37, Eq. (8.432.6)].

Finalmente, substituindo (3.23) e (3.17) em (3.20), e então substituindo esta última e (3.14) em (3.19), uma expressão fechada para a probabilidade de *outage*

para o protocolo de cooperação AF com ganho variável pode ser obtida como

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^{\text{AF}_{\text{VG}}} &= \prod_{l=1}^L \left[1 - \frac{\Gamma(M, \gamma_{\text{th}} \lambda_{SD_l})}{\Gamma(M)} \right] \overbrace{\sum_{l=1}^L \left(1 + \sum_{k=1}^{L-1} \sum_{\substack{A_k \subseteq \{1, 2, \dots, l-1, l+1, \dots, L\} \\ |A_k|=k}} (-1)^k \frac{\lambda_{SD_l}}{\lambda_{SD_l} + \sum_{j \in A_k} \lambda_{SD_j}} \right)}^{\Xi} \\
&\times \prod_{n=1}^N \left(1 - \frac{\lambda_{SR_n}^M e^{-\gamma_{\text{th}}(\lambda_{SR_n} + \lambda_{R_n D_l})}}{\Gamma(M)} \right) \sum_{k=0}^{M-1} \left[2\gamma_{\text{th}}^{M-k-1} \binom{M-1}{k} \left[\frac{(\gamma_{\text{th}} + 1)\gamma_{\text{th}}\lambda_{R_n D_l}}{\lambda_{SR_n}} \right]^{\frac{k+1}{2}} K_{k+1}(\beta) \right].
\end{aligned} \tag{3.24}$$

Semelhantemente à (3.18), a Eq. (3.24) é constituída de operações matemáticas elementares e facilmente implementadas computacionalmente.

3.6.3 Amplifica-e-encaminha com ganho fixo (AF_{FG})

No intuito de aliviar a necessidade de monitoramento contínuo dos canais pertencendo ao primeiro salto de transmissão e, ainda assim, apresentar desempenho comparável ao protocolo de cooperação AF_{VG}, *relays* AF com ganho fixo podem ser empregados. Como explicitado anteriormente, nesse caso, apenas informações estatísticas do canal (*statistical CSI*) são necessárias. De (3.10), a probabilidade de outage pode ser escrita como

$$P_{\text{out}}^{\text{AF}_{\text{FG}}} = \Pr(\gamma_{\text{end}} < \gamma_{\text{th}}) = \Pr\left(\max_l [\gamma_{SD_l}] < \gamma_{\text{th}}\right) \times \underbrace{\Pr\left(\max_n \left[\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{C + \gamma_{R_n D^*}} \right] < \gamma_{\text{th}}\right)}_{\Delta}. \tag{3.25}$$

De acordo com o teorema da probabilidade total [38], Δ pode ser reescrito como

$$\Delta = \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \times \prod_{n=1}^N \underbrace{\Pr\left(\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D_l}}{C + \gamma_{R_n D_l}} < \gamma_{\text{th}}\right)}_{\Theta}, \tag{3.26}$$

na qual Θ é expresso como

$$\Theta = \int_0^{\infty} \Pr\left[\frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D_l}}{C + \gamma_{R_n D_l}} < \gamma_{\text{th}}\right] f_{\gamma_{SR_n}}(\gamma_{SR_n}) d\gamma_{SR_n}. \tag{3.27}$$

Com o auxílio de [37, Eqs. (3.381.3) e (3.471.9)], Θ pode ser reduzido à

$$\Theta = 1 - \frac{\lambda_{SR_n}^M e^{-\gamma_{th} \lambda_{SR_n}}}{\Gamma(M)} \sum_{k=0}^{M-1} 2\gamma_{th}^{M-k-1} \binom{M-1}{k} \left(\frac{C\gamma_{th} \lambda_{R_n D_l}}{\lambda_{SR_n}} \right)^{\frac{k+1}{2}} K_{k+1} (2\sqrt{C\gamma_{th} \lambda_{R_n D_l} \lambda_{SR_n}}). \quad (3.28)$$

Finalmente, substituindo (3.28) e (3.17) em (3.26) e, então, ajustando esta última e (3.14) em (3.25), uma expressão fechada para a probabilidade de *outage* para o protocolo de cooperação AF com ganho fixo pode ser obtida como

$$P_{out}^{AF_{FG}} = \prod_{l=1}^L \left[1 - \frac{\Gamma(M, \gamma_{th} \lambda_{SD_l})}{\Gamma(M)} \right] \sum_{l=1}^L \overbrace{\left(1 + \sum_{k=1}^{L-1} \sum_{\substack{A_k \subseteq \{1, 2, \dots, l-1, l+1, \dots, L\} \\ |A_k|=k}} (-1)^k \frac{\lambda_{SD_l}}{\lambda_{SD_l} + \sum_{j \in A_k} \lambda_{SD_j}} \right)}^{\Xi} \\ \times \prod_{n=1}^N \left\{ 1 - \frac{\lambda_{SR_n}^M e^{-\gamma_{th} \lambda_{SR_n}}}{\Gamma(M)} \sum_{k=0}^{M-1} \left[2\gamma_{th}^{M-k-1} \binom{M-1}{k} \left(\frac{C\gamma_{th} \lambda_{R_n D_l}}{\lambda_{SR_n}} \right)^{\frac{k+1}{2}} K_{k+1} (2\sqrt{C\gamma_{th} \lambda_{R_n D_l} \lambda_{SR_n}}) \right] \right\}. \quad (3.29)$$

Fazendo $M = 1$ em (3.18), (3.24) e (3.29), as probabilidades de outage para o modelo sistêmico proposto são obtidas para o caso em que a fonte está equipada com uma única antena.

3.7 Análise Assintótica

Das Eqs. (3.18), (3.24) e (3.29), pouca informação pode-se extrair do comportamento de outage em relação às variáveis do sistema. Assim, com o intuito de obter o ganho de diversidade do esquema proposto em função das variáveis do sistema, realizou-se aqui uma análise assintótica destas equações.

Definindo $\bar{\gamma} \triangleq 1/N_0$ como a SNR sistêmica, é fácil ver que λ_{SD_l} , λ_{SR_n} , e $\lambda_{R_n D_l}$ são inversamente proporcionais à $\bar{\gamma}$. Então, sabendo que $\Gamma(M) = \Gamma(M, x) + \gamma(M, x)$, tem-se

$$1 - \frac{\Gamma(M, \gamma_{th} \lambda_A)}{\Gamma(M)} = \frac{\gamma(M, \gamma_{th} \lambda_A)}{\Gamma(M)}, \quad (3.30)$$

na qual $A \in \{SD_l, SR_n\}$ e $\gamma(\cdot, \cdot)$ denota a função inferior Gamma incompleta [37, Eq.

(8.350.1)]. Com $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$, de [37, Eq. (8.354.1)] tem-se que

$$\begin{aligned} \frac{\gamma(M, \gamma_{th} \lambda_A)}{\Gamma(M)} &\simeq \frac{1}{\Gamma(M)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (\gamma_{th} \lambda_A)^{M+n}}{n!(M+n)} \\ &\simeq \frac{(\gamma_{th} \lambda_A)^M}{M\Gamma(M)} \simeq \frac{(\gamma_{th} \lambda_A)^M}{\Gamma(M+1)} \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^M, \end{aligned} \quad (3.31)$$

onde \simeq implica “*assintoticamente igual a*” e \propto implica “*proporcional a*”.

Assim, usando a expansão de MacLaurin para funções exponenciais, segue-se que

$$1 - e^{(-\gamma_{th} \lambda_{R_n D_l})} \simeq \gamma_{th} \lambda_{R_n D_l}. \quad (3.32)$$

Por fim, substituindo apropriadamente (3.31) em (3.30), e aplicando esta última juntamente com (3.32) em (3.18), uma expressão para a probabilidade assintótica do caso DF é obtida como segue

$$P_{\text{out}}^{\text{DF}} \simeq \begin{cases} \prod_{l=1}^L \left[\frac{(\gamma_{th} \lambda_{SD_l})^M}{\Gamma(M+1)} \right] (\Xi) \times \prod_{n=1}^N (\gamma_{th} \lambda_{R_n D_l}), & \text{se } M \geq 2, \\ \prod_{l=1}^L (\gamma_{th} \lambda_{SD_l}) (\Xi) \times \prod_{n=1}^N (\gamma_{th} \lambda_{SR_n} + \gamma_{th} \lambda_{R_n D_l}), & \text{se } M = 1. \end{cases} \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{ML+N}. \quad (3.33)$$

Seguindo procedimento semelhante, expressões para a probabilidade assintótica dos casos de *relay* AF com ganho variável e com ganho fixo podem ser obtidas, respectivamente, como segue

$$P_{\text{out}}^{\text{AFVG}} \simeq \prod_{l=1}^L \left[\frac{(\gamma_{th} \lambda_{SD_l})^M}{\Gamma(M+1)} \right] (\Xi) \times \prod_{n=1}^N [\gamma_{th} (\lambda_{SR_n} + \lambda_{R_n D_l})] \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{ML+N}, \quad (3.34)$$

e

$$P_{\text{out}}^{\text{AFFG}} \simeq \prod_{l=1}^L \left[\frac{(\gamma_{th} \lambda_{SD_l})^M}{\Gamma(M+1)} \right] (\Xi) \times \prod_{n=1}^N (\gamma_{th} \lambda_{SR_n}) \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{ML+N}. \quad (3.35)$$

De (3.33), (3.34) e (3.35), é fácil ver que a ordem de diversidade do esquema proposto é igual a $ML + N$, que é a mesma obtida para o esquema de seleção ótimo. Intuitivamente, o termo ML é proveniente da fase de transmissão direta (fase I da transmissão), onde a fonte equipada com M múltiplas antenas seleciona o melhor destino dentre L possíveis. O segundo termo N vem da fase de transmissão

cooperativa (fase II da transmissão). Como o primeiro salto consiste na transmissão do sinal por uma fonte com múltiplas antenas para o *relay* selecionado e o segundo salto consiste na transmissão do sinal por um *relay* equipado com uma única antena, o segundo salto é o ponto limitante em redes cooperativas duplo-salto com múltiplos nós e múltiplos *relays*. Ou seja, para a fase cooperativa a ordem de diversidade é limitada pelo número de *relays* N .

Capítulo 4

Resultados Numéricos, Simulações e Discussões

Neste capítulo, o desempenho de *outage* de redes cooperativas multinós multi-*relay* é avaliado através de simulações numéricas. Para tal, a média estatística dos ganhos de canal entre dois nós quaisquer é determinada pela distância entre os nós. A validade da descrição matemática apresentada no capítulo anterior é também demonstrada através dos gráficos. Além disso, é realizada uma comparação com o esquema de seleção ótimo e comprovada a aplicabilidade do esquema proposto.

A probabilidade de *outage* é analisada em termos da SNR sistêmica, do número de nós, do número de antenas na fonte e do protocolo de cooperação empregado. É avaliada a melhor posição do nó *relay* em termos da quantidade de nós *relay* e de nós destino. Além disso, os dois esquema de seleção (proposto e ótimo) são comparados em função dos tempos de simulação.

Exceto quando mencionado o contrário, o expoente de perda de percurso é ajustado como $\rho = 4$ e o limiar que define a probabilidade de *outage* é $\gamma_{th} = 3$ dB. Como será observado, todos os casos revelam excelente compatibilidade entre os resultados de simulação e analíticos. A energia média total por símbolo do sistema foi normalizada à unidade e uma alocação igual de energia é considerada, ou seja, $E_S = E_R = 1/2$.

4.1 Comparação entre o esquema de seleção proposto e o esquema de seleção conjunta (ótimo)

Com o intuito de comparar o esquema proposto com o esquema de seleção conjunta (ótimo), duas topologias de rede 2-D são consideradas:

4.1.1 Posicionamento dos nós uniformemente distribuído

A fonte é posicionada em $(0, 0)$ e os N relays e os L destinos são uniformemente distribuídos na região coordenada do primeiro quadrante 1×1 .

4.1.2 Posicionamento dos nós fixo

A fonte é posicionada em $(0, 0)$, os N relays são aglutinados e posicionados em $(0.5, 0.5)$ e os L destinos são aglutinados e posicionados em $(1, 1)$.

Assumindo cenários de posicionamento de nós uniformemente distribuído e fixo, respectivamente, Figs. 4.1 e 4.2 apresentam a probabilidade de *outage* em função da SNR sistêmica $\bar{\gamma} = 1/N_0$ para diferentes números de nós destino ($L = 2, 3, 4$) e considerando $M = 1, N = 2$. Além disso, o protocolo de cooperação DF foi utilizado. Das Figs. 4.1 e 4.2, nota-se quão próximo é o desempenho do esquema de seleção proposto comparado ao esquema de seleção ótimo, com as curvas sendo praticamente coincidentes na Fig. 4.1 para cada conjunto (N, L) . Por outro lado, na Fig. 4.2, um *gap* de cerca de 2 dB de desempenho é observado entre os dois esquemas, independente do número de destinos empregados. Entretanto, na prática essa perda de desempenho é compensada pela diminuição da complexidade do esquema proposto quando comparado ao esquema ótimo.

Da mesma forma, Figs. 4.3 e 4.4 apresentam a comparação entre o esquema de seleção proposto e o esquema de seleção conjunta para o protocolo de cooperação AF com ganho variável e considerando os cenários de posicionamento de nós uniformemente distribuído e fixo, respectivamente. Observam-se aqui as mesmas observações feitas para o caso DF, com um ligeiro afastamento entre os dois esquemas para o caso uniformemente distribuído. Isso se deve ao fato de a aleatoriedade da distribuição dos nós interferir no cálculo dos ganhos aplicados aos nós *relay*.

Igualmente, a comparação entre os dois esquemas para o caso AF com ganho fixo é observada nas Figs. 4.5 e 4.6 para os cenários de posicionamento de nós uniformemente distribuído e fixo, respectivamente. Neste caso, as mesmas

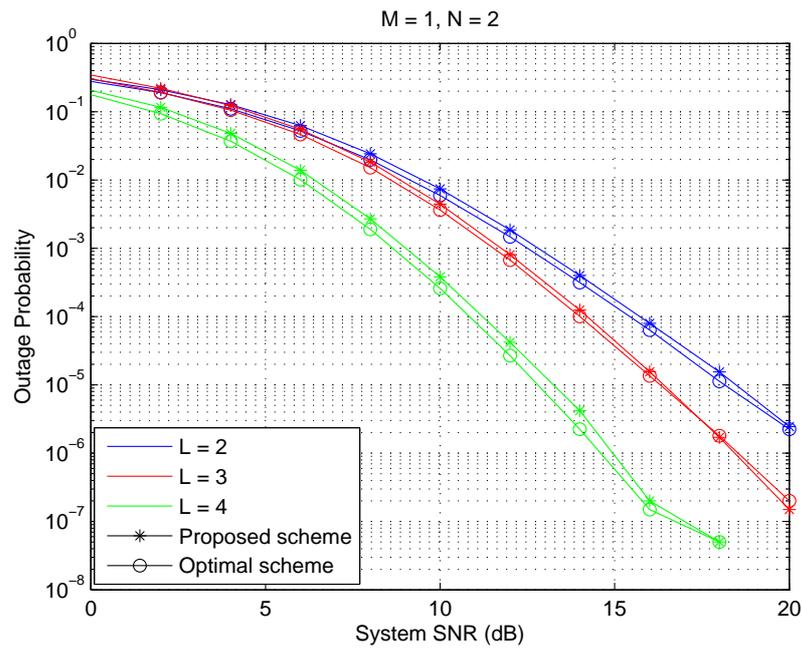


Figura 4.1: Probabilidade de *outage* versus SNR sistêmica para posicionamento de nós uniformemente distribuído e diferente número de nós destino (Decodifica-e-Encaminha).

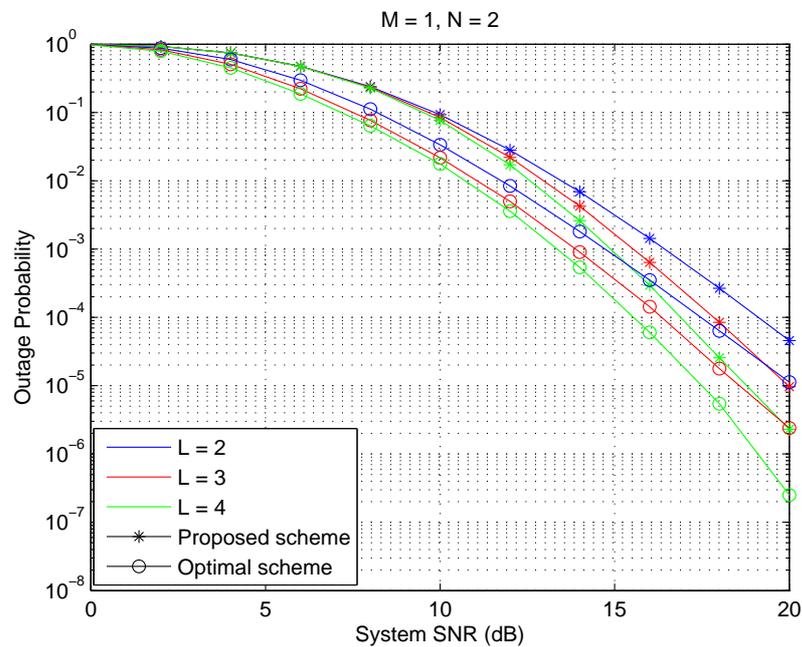


Figura 4.2: Probabilidade de *outage* versus SNR sistêmica para posicionamento de nós fixo e diferente número de nós destino (Decodifica-e-Encaminha).

conclusões obtidas para o caso AF com ganho variável podem ser aplicadas com um ligeiro aumento da probabilidade de *outage* devido à simplicidade no cálculo do

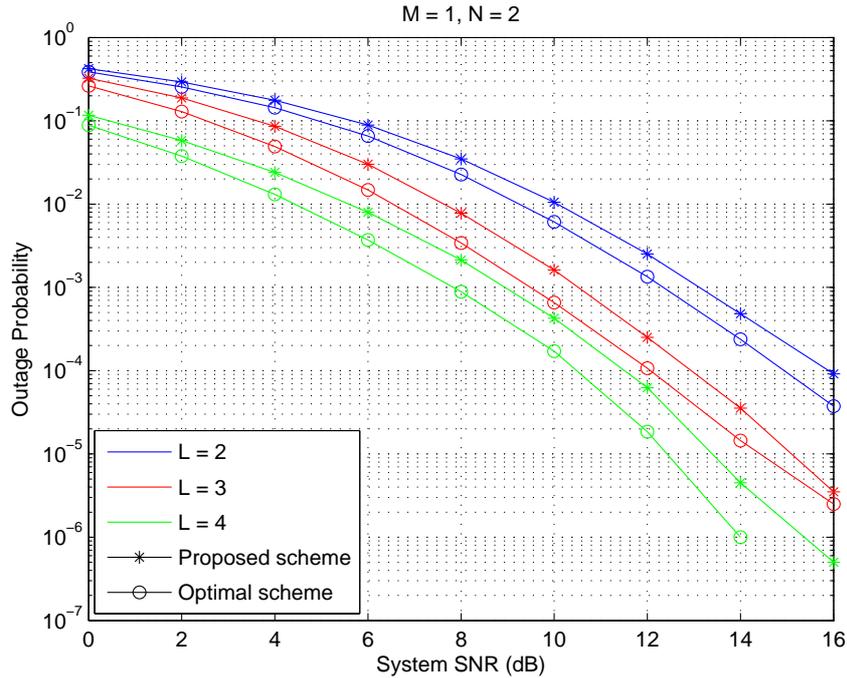


Figura 4.3: Probabilidade de *outage* versus SNR sistêmica para posicionamento de nós uniformemente distribuído e diferente número de nós destino (Amplifica-e-Encaminha com ganho variável).

ganho para o AF fixo.

Como discutido anteriormente, uma das vantagens do esquema proposto sobre o esquema ótimo é a redução do número de estimações de canal. Isso afeta diretamente o tempo de simulação necessário para avaliação de desempenho entre os dois esquemas. De modo a quantificar essa métrica, foram avaliados os tempos de simulação dos dois esquemas. Assim, foi utilizado um computador equipado com um processador Intel(R) Core(TM) 2 Duo, 170 GB de espaço livre em disco e RAM de 2 GB.

As tabelas 4.1 e 4.2 mostram os tempos de simulação para os cenários de posicionamento fixo e uniformemente distribuído, respectivamente, considerando diferente número de nós destinos L e considerando $M = 1, N = 2$. Como pode ser observado, quando L aumenta, a diferença de tempo de simulação entre o esquema proposto e o esquema de seleção conjunta aumenta. Em redes altamente densas, essa diferença se torna ainda mais visível, de tal maneira que o esquema proposto se torna uma opção mais viável a prover comunicação em tais redes.

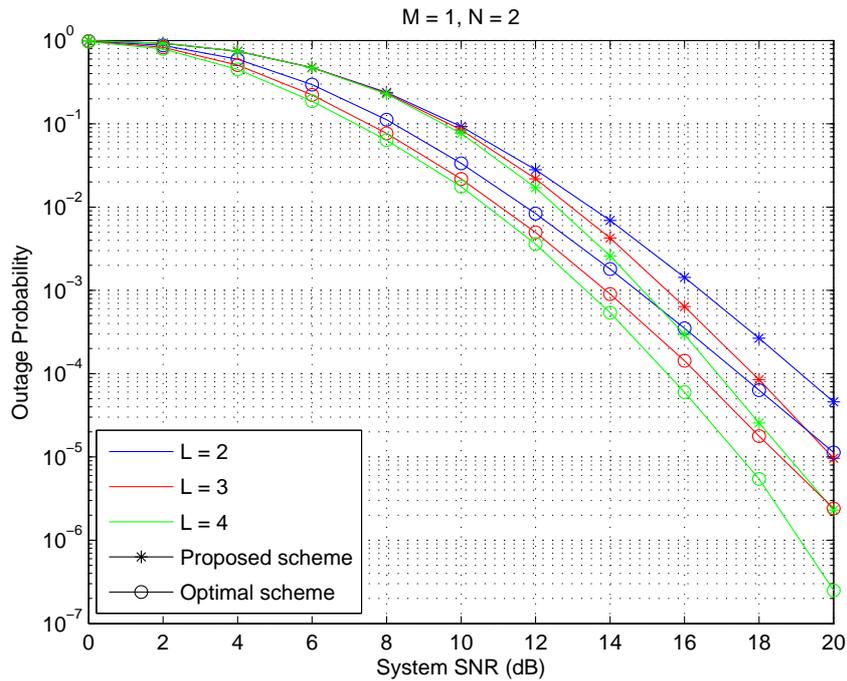


Figura 4.4: Probabilidade de *outage* versus SNR sistêmica para posicionamento de nós fixo e diferente número de nós destino (Amplifica-e-Encaminha com ganho variável).

Tabela 4.1: Tempo de simulação (em segundos) para $M = 1, N = 2$ e diferente número de nós destinos L em cenário com posicionamento fixo.

Num - Dest.	Esquema proposto	Esquema ótimo
$L = 2$	11.7095	13.3458
$L = 3$	13.4137	18.4481
$L = 4$	15.3096	23.8694

Tabela 4.2: Tempo de simulação (em segundos) para $M = 1, N = 2$ e diferente número de nós destinos L em cenário com posicionamento uniformemente distribuído.

Num - Dest.	Esquema proposto	Esquema ótimo
$L = 2$	11.6962	13.3221
$L = 3$	13.3968	18.3890
$L = 4$	15.2661	23.6539

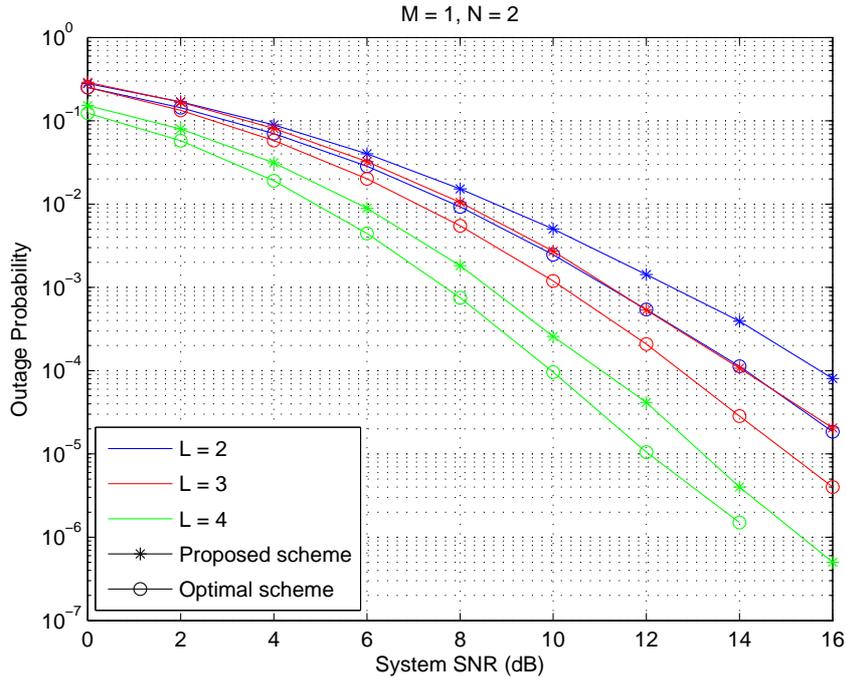


Figura 4.5: Probabilidade de *outage* versus SNR sistêmica para posicionamento de nós uniformemente distribuído e diferente número de nós destino (Amplifica-e-Encaminha com ganho fixo).

4.2 Probabilidade de *outage* e análise assintótica para diferentes protocolos de cooperação

Como apresentado no capítulo anterior, três protocolos de cooperação foram desenvolvidos nesse trabalho: DF, AF com ganho variável e AF com ganho fixo. Assim, expressões fechadas para a probabilidade de bloqueio (*outage*) foram obtidas e as respectivas expressões assintóticas foram deduzidas.

Dessa forma, a Fig. 4.7 apresenta o comportamento de *outage* do esquema de seleção proposto para os três protocolos de cooperação descritos anteriormente, posicionamento de nós fixo e fonte equipada com uma única antena ($M=1$). Note que para $N=2, L=3$ and $N=3, L=2$ a mesma ordem de diversidade é obtida ($ML+N=5$). Além disso, uma ordem de diversidade melhor é alcançada quando $N=4, L=4$ ($ML+N=8$). Observa-se também que para elevados valores de SNR a curva assintótica se aproxima da curva da probabilidade de *outage*. O caso de comunicação direta (sem cooperação) é também apresentado apenas para efeito de comparação.

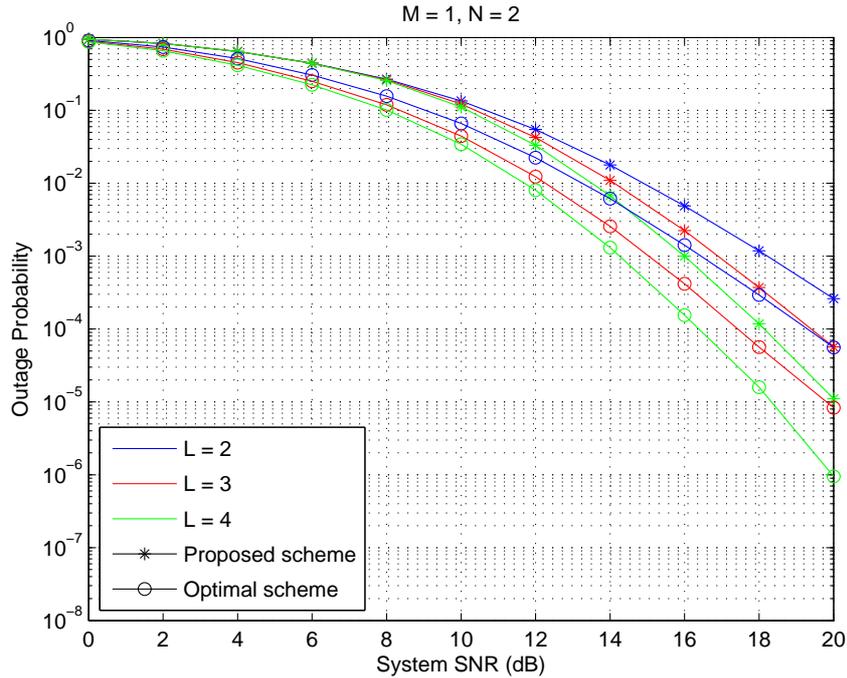


Figura 4.6: Probabilidade de *outage* versus SNR sistêmica para posicionamento de nós fixo e diferente número de nós destino (Amplifica-e-Encaminha com ganho fixo).

Os protocolos DF e AF com ganho variável apresentam resultados semelhantes para altas SNRs, com o DF apresentando desempenho ligeiramente melhor para baixas SNRs, enquanto o protocolo AF com ganho fixo apresenta resultados piores. Isso acontece porque o processamento do sinal realizado pelo *relay* no caso DF reduz a propagação de erros. Além disso, no caso AF com ganho variável, o ganho instantâneo aplicado no *relay* é melhor que o ganho estatístico aplicado no caso AF com ganho fixo, devido à melhor estimação do canal que ocorre naquele, embora isso se converta em um aumento de complexidade, como já discutido.

4.3 Probabilidade de *outage* para diferente número de antenas na fonte

Em seguida, foi avaliada a influência do número de antenas na fonte na probabilidade de *outage*. A Fig. 4.8 apresenta o desempenho de *outage* para os três protocolos de cooperação, posicionamento dos nós fixo, assumindo $N = L = 3$ e diferente número de antenas na fonte. Como esperado, aumentando M , observa-se que tanto o desempenho de *outage* quanto a ordem de diversidade aumentam. Isso mostra que embora o caso multi-antena apresente perdas em termo de eficiência

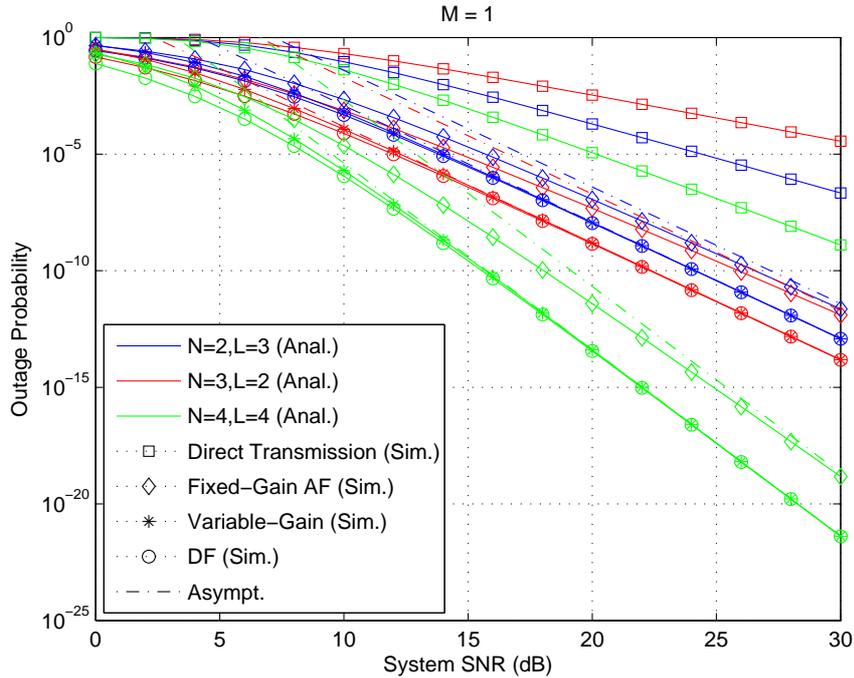


Figura 4.7: Probabilidade de *outage* versus SNR sistêmica para os três protocolos de cooperação e diferentes números de nós ($N = 2, L = 3$; $N = 3, L = 2$; $N = L = 4$) para o caso de fonte com uma antena ($M = 1$).

espectral, ele traz considerável melhoria de desempenho. Como esperado, as curvas assintóticas se aproximam das curvas da probabilidade de *outage* para elevadas SNRs.

4.4 Impacto de N e L na posição do *relay*

Considerando *relays* DF, a Fig. 4.9 analisa o impacto do número de nós destino L no posicionamento de *relay* para $M = 1$, $N = 2$ e $\bar{\gamma} = 6$ dB. Sem perda de generalidade, a distância entre fonte e destinos é uniformemente distribuída entre 0.9 e 1.1. Pode-se observar que à medida que o número de destinos aumenta, a posição ótima do *relay* move-se do ponto médio (entre fonte e destino) em direção à fonte. Isso ocorre porque, à medida que L aumenta, a probabilidade de selecionar um melhor destino também aumenta e tanto o *link* direto quanto o segundo salto (*relay*-destino) do *link* cooperativo tendem a apresentar melhores condições de canal. Assim, com o intuito de aumentar a qualidade do primeiro salto (fonte-*relay*), o *relay* tende a se aproximar da fonte.

Na Fig. 4.10, a posição ótima do *relay* é analisada sob diferentes números de *relays*

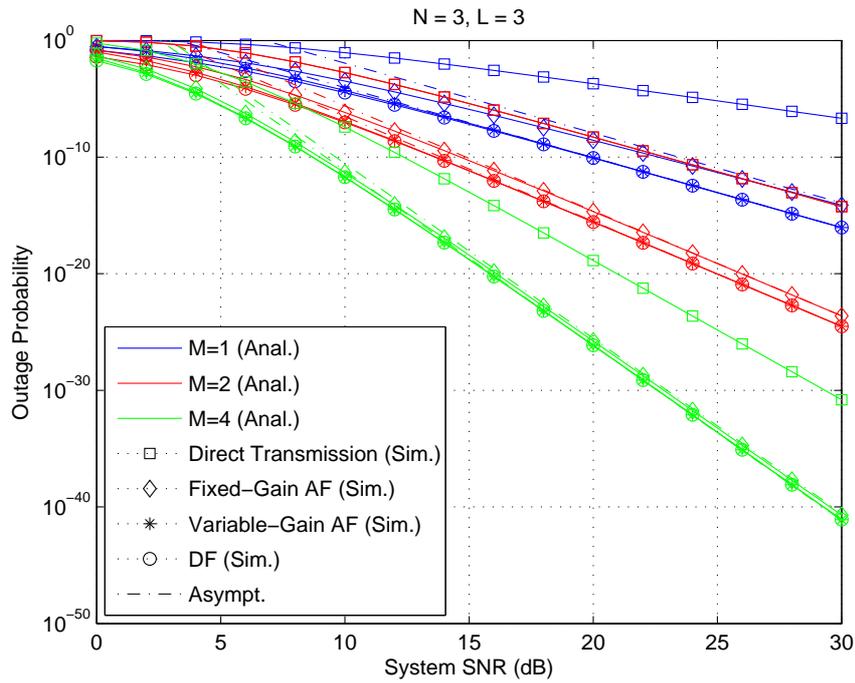


Figura 4.8: Probabilidade de *outage* versus SNR sistêmica para os três protocolos de cooperação, assumindo $N = L = 3$ e múltiplas antenas na fonte ($M = 1, 2$ e 4).

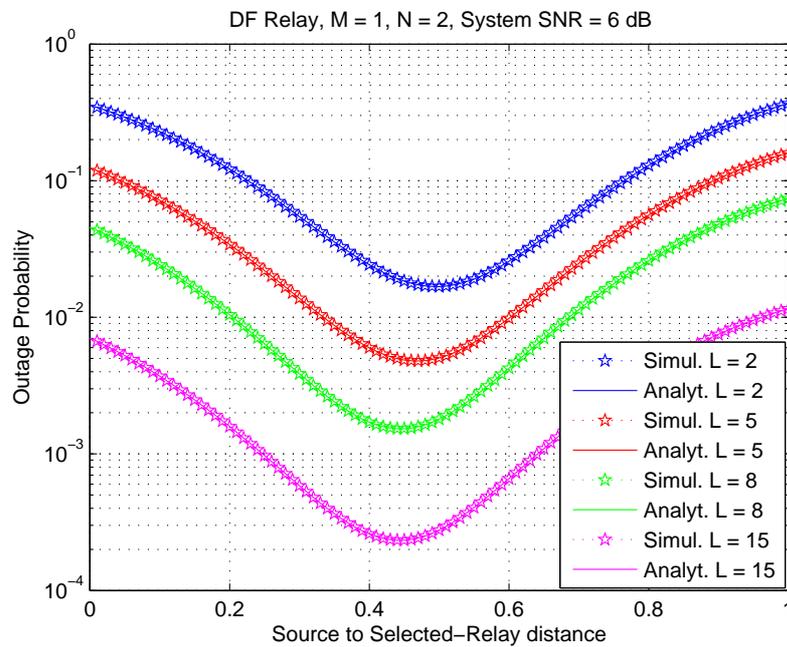


Figura 4.9: Probabilidade de *outage* versus distância fonte-*relay* d_{SR^*} para diferentes números de destinos.

($N = 2, 5, 8$) e considerando $M = 1$, $L = 2$, e $\bar{\gamma} = 0$ dB. Como pode ser observado, quando o número de *relays* aumenta, a posição ótima do *relay* desloca-se na direção do ponto médio entre a fonte e o destino selecionado. A explicação para isso provém do fato de que, como o número de *relays* aumenta, a qualidade do canal tanto do primeiro como do segundo salto tende a ficar balanceada. Portanto, é esperado que localizando o *relay* no ponto médio entre fonte e destino a probabilidade de *outage* seja minimizada.

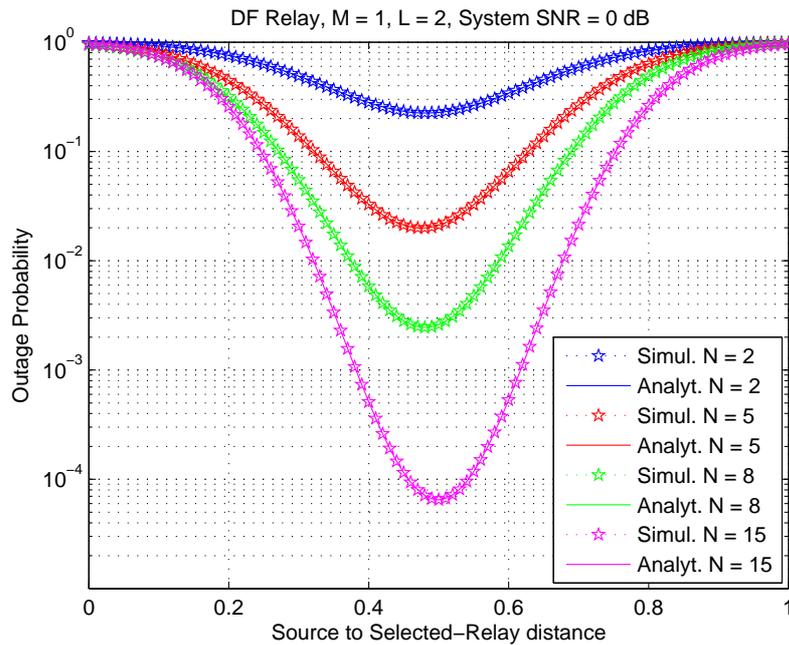


Figura 4.10: Probabilidade de *outage* versus distância fonte-*relay* d_{SR^*} para diferentes números de *relays*.

Considerando *relays* AF com ganho variável, Figs. 4.11 e 4.12 mostram a mesma análise desenvolvida nas Figs. 4.9 e 4.10 para *relays* DF, respectivamente. Nota-se que, agora, a melhor posição do nó *relay* não é significativamente influenciada pelo número de *relays* e destinos. Mais especificamente, na Fig. 4.11, a melhor posição para o *relay* encontra-se próxima a 0.55 independentemente do valor de L e na Fig. 4.12, está posição encontra-se próxima do ponto médio entre fonte e destino para diferentes valores de N . Isso é justificado pelo fato de que, como o *relay* opera no modo AF, ele sempre irá transmitir o sinal proveniente da fonte. Portanto, posicionar o *relay* aproximadamente no ponto médio entre fonte e destino apresenta-se como uma boa solução no intuito de minimizar a probabilidade de *outage* fim a fim.

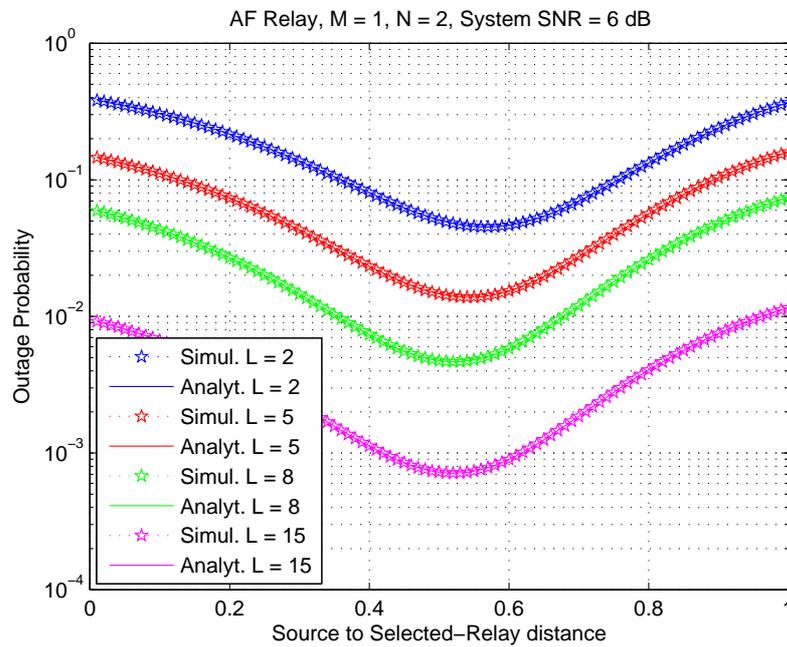


Figura 4.11: Probabilidade de *outage* versus distância fonte-*relay* d_{SR^*} para diferentes números de destinos.

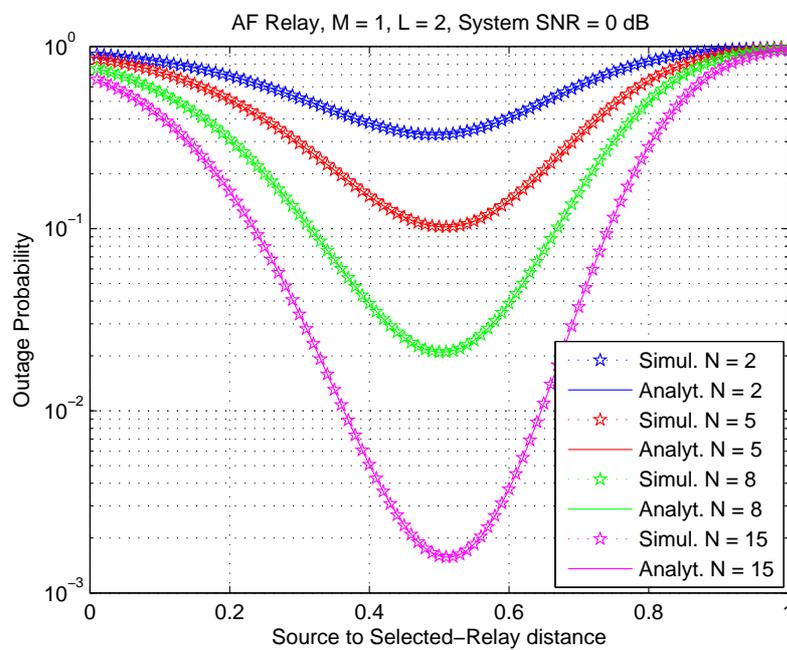


Figura 4.12: Probabilidade de *outage* versus distância fonte-*relay* d_{SR^*} para diferentes números de *relays*.

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas

Os benefícios em termos de desempenho e qualidade de serviço proveniente de redes de cooperação em sistemas de comunicação sem fio já estão bem estabelecidos na literatura. Da mesma forma, as melhorias trazidas em redes multiusuário foram comprovadas em diversos trabalhos. No entanto, o estudo simultâneo dessas duas novas estratégias está apenas começando a ser investigado.

Nesta dissertação, foi proposto um novo esquema de seleção eficiente e de baixa complexidade para redes multiusuário em sistemas cooperativos multi-*relay* compostos de uma fonte S equipada com M múltiplas antenas, N *relays* e L destinos. Tal esquema é eficiente no sentido de que possui desempenho aproximado ao esquema de seleção ótimo e de baixa complexidade pois requer uma quantidade inferior de estimativas de canal e comparação entre *links* em relação ao esquema de seleção conjunta. Além disso, o esquema de seleção proposto pode ser implementado tanto de forma centralizada quanto distribuída, enquanto que o esquema de seleção ótimo só pode ser implementado de forma centralizada.

O esquema de seleção proposto foi analisado em termos da probabilidade de *outage* e expressões fechadas foram obtidas para três diferentes protocolos de cooperação empregados. Além disso, a análise assintótica de tais expressões revelou uma diversidade $ML+N$. Por meio de simulação numérica, o desempenho de *outage* foi comprovado e revelou-se excelente concordância entre os dados de simulação e a análise matemática.

Diversas aplicações do modelo considerado podem ser ainda estudadas. O esquema de seleção proposto pode ser aplicado a diversos cenários, como por

exemplo:

- ▶ Modelos que consideram erros de estimação de canal;
- ▶ Sistemas veiculares;
- ▶ Redes cognitivas;
- ▶ Modelos de seleção de melhor antena;

entre outros.

Referências Bibliográficas

- [1] K. J. Ray Liu, A. K. Sadek, W. Su and A. Kwasinski. *Cooperative Communications and Networking*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2009.
- [2] A. Goldsmith. *Wireless Communications*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.
- [3] A. Nosratinia, T. E. Hunter and A. Hedayat. Cooperative communication in wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 42, n. 10, p. 74–80, Oct. 2004.
- [4] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Trans. Information Theory*, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, Dec. 2004.
- [5] R. Knopp and P. A. Humblet. Information capacity and power control in single-cell multiuser communications. *Proceedings IEEE International Conference on Communications (ICC)*, p. 331–335, 1995.
- [6] V.H. McDonald. The cellular concept. *Bell System Tech*, 1979.
- [7] D. G. Brennan. Linear diversity combining techniques. *Proceedings of the IEEE*, v. 91, n. 2, p. 331–356, Feb. 2003.
- [8] A. Sendonaris, E. Erkip and B. Aazhang. User Cooperation Diversity Part I: System Description. *IEEE Transactions on Communications*, v. 51, n. 11, p. 1927–1938, Nov. 2003.

- [9] A. Sendonaris, E. Erkip and B. Aazhang. User Cooperation Diversity Part II: Implementation Aspects and Performance Analysis. *IEEE Transactions on Communications*, v. 51, n. 11, p. 1939–1948, Nov. 2003.
- [10] T. E. Hunter and A. Nosratinia. Cooperation diversity through coding. *IEEE International Symposium on Information Theory*, v. 36, n. 4, p. 220, Jul. 2002.
- [11] T. E. Hunter and A. Nosratinia. Diversity through coded cooperation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 5, n. 2, p. 283–289, Feb. 2006.
- [12] A. S. Ibrahim, A. K. Sadek, W. Su and K. J. R. Liu. Cooperative communications with relay-selection: when to cooperate and whom to cooperate with? *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 7, n. 7, p. 2814–2827, Jul. 2008.
- [13] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed and A. Lippman. A simple cooperative diversity method based on network path selection. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 24, n. 3, p. 659–672, Sept. 2006.
- [14] Y. Chen, G. Yu, P. Qiu and Z. Zhang. Power-aware cooperative relay selection strategies in wireless ad hoc networks. *IEEE 17th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, p. 1–5, Sept. 2006.
- [15] A. Tajer and A. Nosratinia. Opportunistic Cooperation via Relay Selection with Minimal Information Exchange. *IEEE International Symposium on Information Theory*, p. 1926–1930, Jun. 2007.
- [16] C.-L. Wang and S.-J. Syue. A geographic-based approach to relay selection for wireless ad hoc relay networks. *69th IEEE Vehicular Technical Conference*, p. 1–5, Apr. 2009.
- [17] R. Madan, N. Mehta, A. F. Molisch and J. Zhang. Energy-efficient cooperative relaying over fading channels with simple relay selection. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 7, n. 8, p. 3013–3025, Aug. 2008.
- [18] H. Adam, C. Bettstetter and S. M. Senouci. Adaptive relay selection in cooperative wireless networks. *IEEE 19th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, 2008.

- [19] K.-S. Hwang and Y.-C. Ko. An efficient relay selection algorithm for cooperative networks. *66th IEEE Vehicular Technology Conference*, p. 81–85, 2007.
- [20] D. N. C. Tse. Optimal power allocation over parallel gaussian broadcast channels. *Proc. Int. Symp. Information Theory*, p. 27, Jun. 1997.
- [21] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia. Opportunistic beamforming using dumb antennas. *IEEE Trans. Inform. Theory*, v. 48, n. 6, p. 1277–1294, Jun. 2002.
- [22] R. Gozali, R. M. Buehrer, and B. D. Woerner. The impact of multiuser diversity on space-time block coding. *IEEE Commun. Lett.*, v. 7, n. 5, p. 213–215, May 2003.
- [23] J. Jiang, R. M. Buehrer and W. H. Tranter. Antenna diversity in multiuser data networks. *IEEE Transactions on Communications*, v. 52, n. 3, p. 490–497, Mar. 2004.
- [24] Q. Zhou and H. Dai. Asymptotic analysis on the interaction between spatial diversity and multiuser diversity in wireless networks. *IEEE Trans. Signal Process.*, v. 55, n. 8, p. 4271–4283, Aug. 2007.
- [25] E. G. Larsson. On the combination of spatial diversity and multiuser diversity. *IEEE Communications Letters*, v. 8, n. 8, p. 517–519, Aug. 2004.
- [26] S. Vakil and B. Liang. Decentralized multiuser diversity with cooperative relaying in wireless sensor networks. *4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, p. 560–569, 2007.
- [27] H. J. Joung and C. Mun. Capacity of multiuser diversity with cooperative relaying in wireless networks. *IEEE Communication Letters*, v. 12, n. 10, p. 752–754, Oct. 2008.
- [28] Y. U. Jang, W.-Y. Shin and Y. H. Lee. Multiuser scheduling based on reduced feedback information in cooperative communications. *Proc. IEEE VTC-Spring*, p. 1341–1345, Apr. 2009.
- [29] X. Zhang, W. Wang, and X. Ji. Multiuser diversity in multiuser two-hop cooperative relay wireless networks: System model and performance analysis. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, v. 58, n. 2, p. 1031–1036, Feb. 2009.

- [30] S. Chen, W. Wang, and X. Zhang. Performance analysis of multiuser diversity in cooperative multi-relay networks under Rayleigh-fading channels. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, v. 8, n. 7, p. 3415–3419, Jul. 2009.
- [31] L. Sun, T. Zhang, L. Lu and H. Niu. On the combination of cooperative diversity and multiuser diversity in multi-source multi-relay wireless networks. *IEEE Signal Process. Lett.*, v. 17, n. 6, p. 535–538, Jun. 2010.
- [32] H. Ding, J. Ge, D. B. da Costa, and Z. Jiang. A new efficient low-complexity scheme for multi-source multi-relay cooperative networks. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, v. 60, n. 2, p. 716–722, Feb. 2011.
- [33] T. Duong, V. N. Q. Bao and H. J. Zepernick. On the performance of selection decode-and-forward relay networks over nakagami-m fading channels. *IEEE Communications Letters*, v. 13, n. 3, p. 172–174, Mar. 2009.
- [34] M. O. Hasna and M.-S. Alouini. A performance study of dual-hop transmissions with fixed gain relays. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, v. 3, n. 6, p. 1963–1968, Nov. 2004.
- [35] A. Bletsas, H. Shin, and M. Z. Win. Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 6, n. 9, p. 3450–3460, Sept. 2007.
- [36] T. K. Y. Lo. Maximum ratio transmission. *IEEE Trans. Commun.*, v. 47, n. 10, p. 1458–1461, Oct. 1999.
- [37] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik. *Table of Integrals, Series, and Products*. 7th. ed. San Diego, CA: Academic: SCRIPTA TECHNICA, 2007.
- [38] A. Papoulis. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002. 4th Ed.