

SAMUEL BARALDI MAFRA

**USO DE COOPERAÇÃO EM REDES COGNITIVAS
BASEADAS EM RETRANSMISSÕES HARQ**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná
Orientador: Prof. Dr. Evelio Martín García Fernández
Co-orientador: Prof. Dr. Richard Demo Souza

CURITIBA

2012

SAMUEL BARALDI MAFRA

**USO DE COOPERAÇÃO EM REDES COGNITIVAS
BASEADAS EM RETRANSMISSÕES HARQ**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná
Orientador: Prof. Dr. Evelio Martín García Fernández
Co-orientador: Prof. Dr. Richard Demo Souza

CURITIBA

2012

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE SIGLAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação e Justificativa	1
1.2 Objetivo e Resultados	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 REDES COGNITIVAS	4
2.1 Introdução	4
2.2 Rádio Cognitivo	4
2.3 Protocolo <i>Underlay</i>	5
2.4 Protocolo <i>Overlay</i>	6
2.5 Protocolo <i>Interweave</i>	8
2.6 Protocolo de Rádio Cognitivo Baseado na Exploração de Retransmissões .	10
2.7 Considerações Finais	11
3 COMUNICAÇÃO COOPERATIVA	12
3.1 Introdução	12
3.2 Canal <i>relay</i>	14
3.3 Protocolos de Comunicação Cooperativa	15
3.4 Cooperação Codificada	16

3.5	Múltiplos <i>relays</i>	17
3.6	Considerações Finais	18
4	PROTOCOLO COOPERATIVO DE RÁDIO COGNITIVO EXPLO- RANDO RETRANSMISSÕES DO PRIMÁRIO	20
4.1	Introdução	20
4.2	Modelo do Sistema	20
4.2.1	Protocolo Proposto	22
4.3	Probabilidade de <i>Outage</i> e <i>Throughput</i>	24
4.3.1	Rede Secundária Inativa	24
4.3.2	Rede Secundária Cooperativa	25
4.3.3	Rede Secundária não Cooperativa	31
4.4	Resultados	32
4.4.1	Comparação RC-MRC, RC-SC e PC	33
4.4.2	Comparação do Efeito da Linha de Visada no <i>Throughput</i>	34
4.4.3	Comparações Variando o Número de <i>Relays</i>	35
4.4.3.1	Comparação Com Linha de Visada	35
4.4.3.2	Comparação Com Linha de Visada e Com os Nós do En- lace Secundário Mais Próximos	36
4.4.4	<i>Throughput</i> Para a Rede Com o Enlace Secundário Próximo do Destino Primário	37
4.5	Considerações Finais	38
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	39
	BIBLIOGRAFIA	45

LISTA DE FIGURAS

1.1	Modelo Particular de uma Rede Cognitiva.	1
2.1	Modelo da rede do artigo de Tannious e Nosratinia.	10
2.2	Vazão em função da taxa esperada R_s	11
3.1	Vazão das redes primária e secundária com o uso de múltiplas antenas . . .	13
3.2	Modelo do Canal <i>relay</i>	14
3.3	Comparação da taxa de erro de bit (BER) pela relação sinal-ruído E_b/N_0 dos protocolos decodifica e encaminha.	16
4.1	Modelo do sistema, contendo transmissor primário T_p , destino primário D_p , transmissor secundário T_s , <i>relay</i> R_s e destino secundário D_s	21
4.2	Esquema de Comunicação	24
4.3	Modelo do sistema	32
4.4	Comparação entre os métodos Selection Combining, Parallel Coding e MRC para a rede secundária com um <i>relay</i>	33
4.5	Comparação do efeito da linha de visada no <i>throughput</i>	35
4.6	Comparação variando número de <i>relays</i> com linha de visada	36
4.7	Comparação variando número de <i>relays</i> com linha de visada e os nós do enlace secundário mais próximos	37
4.8	<i>Throughput</i> para a rede com o enlace secundário próximo do receptor primário	38

LISTA DE SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgement</i>
AF	<i>Amplify-and-Forward</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat reQuest</i>
DDF	<i>Dynamic Decode-and-Forward</i>
DF	<i>Decode-and-Forward</i>
D_p	Destino Primário
D_s	Destino Secundário
EGC	<i>Equal Gain Combining</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDF	<i>Fixed Decode-and-Forward</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat reQuest</i>
IDF	<i>Incremental Decode-and-Forward</i>
MRC	<i>Maximal Ratio Combining</i>
NACK	<i>Negative Acknowledgement</i>
PC	<i>Parallel Coding</i>
RC	<i>Repetition Coding</i>
R_s	<i>Relay</i>
SC	<i>Selection Combining</i>
SDF	<i>Selective Decode-and-Forward</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
T_p	Transmissor Primário
T_s	Transmissor Secundário

LISTA DE SÍMBOLOS

λ_{ij}	Energia Média do Canal
h_{ij}	Canal entre o Transmissor i e o Destino j
m_{ij}	Parâmetro de Severidade do Canal
P_p	Potência de Transmissão do Transmissor Primário
P_r	Potência de Transmissão do <i>Relay</i>
P_s	Potência de Transmissão do Transmissor Secundário
$\mathcal{P}\{O_p\}$	Probabilidade de <i>Outage</i> da Rede Primária na Presença da Rede Secundária
$\mathcal{P}\{O_{ini}\}$	Probabilidade de <i>Outage</i> da Transmissão Inicial da Rede Primária
$\mathcal{P}\{O_{pr}\}$	Probabilidade que o <i>Relay</i> não Tenha Decodificado Corretamente a Mensagem do Transmissor Primário
$\mathcal{P}\{O_{ps}\}$	Probabilidade de Falha na Decodificação da Mensagem do Transmissor Primário Pelo Destino Secundário
$\mathcal{P}\{O_{ref}\}$	Probabilidade de <i>Outage</i> da Rede Primária Após uma Retransmissão
$\mathcal{P}\{O_{rs}\}$	Probabilidade do Destino Secundário não Decodificar Corretamente a Mensagem Vinda do <i>Relay</i>
$\mathcal{P}\{O_{sr}\}$	Probabilidade de Falha do Enlace Transmissor Secundário- <i>Relay</i>
$\mathcal{P}\{O_{ss}\}$	Probabilidade de Falha do Enlace Transmissor Secundário-Destino Secundário
$\mathcal{P}\{U_d\}$	Probabilidade da Rede Secundária Estar Ativa
$\mathcal{P}\{U_r\}$	Probabilidade do Enlace Secundário Estar Ativado e que Pelo Menos um <i>Relay</i> Tenha Decodificado as Mensagens dos Transmissores Primário e Secundário
$\mathcal{P}\{O_{SMRC}\}$	Probabilidade de <i>Outage</i> do Destino Utilizando Codificação por Repetição com MRC
$\mathcal{P}\{O_{SPC}\}$	Probabilidade de <i>Outage</i> do Destino Secundário Utilizando Codificação Paralela

$\mathcal{P}\{O_s\}$	Probabilidade de <i>Outage</i> do Secundário sem cooperação
\mathcal{R}_p	Taxa Esperada da Rede Primária
\mathcal{R}_s	Taxa Esperada da Rede Secundária
\mathcal{T}_{IDF}^{MRC}	<i>Throughput</i> do Secundário com Cooperação, MRC e o Método IDF
\mathcal{T}_{SDF}^{MRC}	<i>Throughput</i> do Secundário com Cooperação, MRC e o Método SDF
\mathcal{T}_{IDF}^{PC}	<i>Throughput</i> do Secundário com Cooperação, Codificação Paralela e o Método IDF
\mathcal{T}_{SDF}^{PC}	<i>Throughput</i> do Secundário com Cooperação, Codificação Paralela e o Método SDF
\mathcal{T}_{IDF}^{SC}	<i>Throughput</i> do Secundário Usando Cooperação com Combinação Seletiva e o Método IDF
\mathcal{T}_{SDF}^{SC}	<i>Throughput</i> do Secundário Usando Cooperação com Combinação Seletiva e o Método SDF
\mathcal{T}_p	<i>Throughput</i> do Primário na Presença do Secundário
\mathcal{T}_{ref}	<i>Throughput</i> Esperado da Rede Primária
\mathcal{T}_s	<i>Throughput</i> do Enlace Secundário não Cooperativo

RESUMO

Nesta dissertação é avaliado o uso de cooperação em uma rede cognitiva baseada em HARQ, onde a rede secundária aproveita as oportunidades originadas nas retransmissões do enlace primário. O objetivo principal é propor técnicas com o uso de comunicação cooperativa para conseguir uma transmissão da rede secundária com taxas maiores que as alcançadas na literatura, sem prejudicar significativamente o desempenho da rede primária. Na dissertação são feitas comparações em termos da vazão do sistema entre os protocolos de codificação. Além disso avalia-se o efeito da linha de visada e do número de *relays* cooperando. As simulações demonstram que é possível o enlace secundário se comunicar com altas taxas mantendo uma mínima interferência no enlace primário com o uso de cooperação. Com os nós da rede secundária bem próximos entre si e do transmissor primário é possível obter taxas maiores que as alcançadas pela rede primária.

Palavras chave: Comunicação cooperativa, redes cognitivas, HARQ, múltiplos *relays*, codificação por repetição, codificação paralela, Nakagami- m .

ABSTRACT

This dissertation evaluates the use of cooperation in a cognitive network based on HARQ, where the secondary link exploits the retransmissions of the primary link. The main objective is to propose techniques with the use of cooperative communication to achieve a transmissions rates of the secondary link higher than those achieved in the literature, without significantly harming the performance of the primary network. Comparisons are made in terms of throughput between the coding protocols. The effect of line of sight and the number of cooperating relays is also evaluated. The simulations show that it is possible for the secondary link to communicate with high transmission rates while causing a minimum interference on the primary link with the use of cooperation. When the secondary link nodes are very close to each other and nearby the primary transmitter, it is possible to achieve higher rates than those achieved by the primary link.

Key words: Cooperative communications, cognitive networks, HARQ, multiple relay, repetition coding, parallel coding, Nakagami- m .

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Justificativa

Nos últimos anos tem havido um crescimento no número de sistemas e serviços sem fio como por exemplo as redes locais Wi-Fi, Bluetooth, as redes 3G e os sistemas de televisão digital, entretanto o espectro de radiofrequência é um recurso natural e limitado [1]. Pesquisas recentes mostram que uma grande parte das bandas do espectro está ocupada, existindo uma pequena disponibilidade para novos serviços. Estudos da *Federal Communications Commission* (FCC) [2] mostraram que a maior parte do espectro licenciado não é utilizado na maioria do tempo. Neste cenário surgiu a idéia do rádio cognitivo [3]. Uma nova forma de alocação do espectro em que usuários não licenciados podem se comunicar usando as frequências do espectro licenciado desde que não causem interferência na comunicação dos usuários licenciados, permitindo um uso mais eficiente do espectro.

Uma rede cognitiva é composta por uma rede licenciada (primária) e uma rede não licenciada (secundária) conforme ilustrada na Figura 1.1. Neste caso particular a rede primária é composta por um transmissor primário (T_p), um destino primário (D_p), enquanto que a rede secundária é composta por um transmissor secundário (T_s) e um destino secundário (D_s).

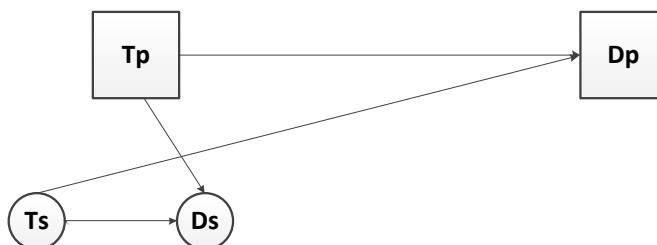


Figura 1.1: Modelo Particular de uma Rede Cognitiva.

Em [4], Tannious e Nosratinia propuseram um protocolo de comunicação para rádio cognitivo, em que a rede secundária aproveita as oportunidades originadas nas retrans-

missões da rede primária. Entretanto, a comunicação da rede secundária causa uma perda de desempenho na rede primária. Para diminuir a interferência da transmissão da rede secundária na rede primária, os autores propuseram técnicas que pressupõem conhecimento do canal pelo transmissor secundário, o que é muito difícil de se conseguir na prática. Em [5] é considerado um cenário semelhante, mas onde são usadas múltiplas antenas nos nós secundários. O uso de múltiplas antenas possibilita uma grande diminuição na interferência na rede primária e boas taxas na rede secundária sem necessitar de conhecimento prévio do canal no transmissor secundário. O uso desta técnica é complicado principalmente na área de redes de sensores sem fio, em que o tamanho ou custo do aparelho impossibilita a instalação de múltiplas antenas.

Uma alternativa ao caso de múltiplas antenas é a chamada comunicação cooperativa [6–8], em que um ou mais nós *relays* cooperam com a comunicação entre fonte e destino. Diversidade espacial é obtida mesmo no caso de dispositivos com uma única antena.

1.2 Objetivo e Resultados

O objetivo principal da dissertação é propor técnicas com o uso de comunicação cooperativa para conseguir uma transmissão da rede secundária com taxas maiores que as alcançadas na literatura, sem prejudicar significativamente o desempenho da rede primária e sem considerar conhecimento global dos canais pelo transmissor secundário nem múltiplas antenas.

Na dissertação consideramos o mesmo cenário que [4, 5], porém exploramos o uso de comunicação cooperativa na rede secundária. A cooperação pode ocorrer com o uso de um ou mais *relays*.

Através de resultados numéricos verifica-se que com o uso da cooperação na rede secundária, é possível atingir altas taxas no enlace secundário sem afetar o desempenho da rede primária.

1.3 Estrutura da Dissertação

O restante da dissertação está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 são apresentados o conceito de rádio cognitivo e os três protocolos mais conhecidos de acesso ao espectro. No Capítulo 3 são apresentados os principais conceitos de comunicação cooperativa. No Capítulo 4 é feita uma análise do uso de cooperação em uma rede cognitiva baseada em HARQ. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais e propostas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REDES COGNITIVAS

2.1 Introdução

Nas últimas décadas houve um crescimento exponencial de sistemas e serviços de comunicação sem fio comprometendo a disponibilidade do espectro de radiofrequência. Estudos mostram que quase todas as bandas estão ocupadas, existindo uma pequena disponibilidade para novos serviços [1]. Neste cenário surgiu a ideia do rádio cognitivo [3]. Uma nova forma de alocação do espectro em que usuários não licenciados podem se comunicar usando as frequências do espectro licenciado desde que não causem interferência na comunicação dos usuários licenciados.

Neste capítulo são apresentados o conceito de rádio cognitivo, as principais formas de acesso ao espectro e suas características.

2.2 Rádio Cognitivo

O termo rádio cognitivo foi introduzido por Mitola em [3] para designar redes inteligentes de comunicação que conhecem o ambiente e seus recursos e que são capazes de alterar seus parâmetros, com estratégias complexas de adaptação, em caso de mudanças. Segundo Haykin [9], rádio cognitivo é um sistema de comunicação sem fio inteligente que faz modificações em certos parâmetros de funcionamento (potência de transmissão, frequência de portadora, etc) em tempo real, com dois objetivos principais:

- comunicação altamente confiável quando e onde necessário;
- utilização eficiente do espectro de rádio.

O sistema de rádio cognitivo usa a tecnologia de rádio definido por software para se reconfigurar, que envolve ações como adaptação da interface de rádio às variações

de novos padrões, incorporação de novas aplicações, serviços e atualizações de software, além da exploração de serviços providos pela rede. Para as outras habilidades o rádio cognitivo usa processamento de sinais e processos de aprendizagem de máquina para a sua implementação. O processo cognitivo começa com o sensoriamento dos estímulos de rádio frequência e culmina com ação. As três tarefas executadas em tempo real pelo rádio cognitivo, segundo Haykin [9], são:

1. Análise do ambiente, que envolve os seguintes atos:
 - estimação do nível de interferência aceito pelo cenário;
 - detecção de espaços vazios no espectro.
2. Identificação do canal, que compreende os seguintes atos:
 - estimação da informação do estado do canal;
 - predição da capacidade do canal para uso do transmissor.
3. Controle da potência de transmissão e gerenciamento dinâmico do espectro.

As tarefas 1 e 2 são executadas no transmissor enquanto que a tarefa 3 é executada pelo destino.

São três os protocolos de comunicação para rádio cognitivo mais conhecidos: *underlay*, *overlay* e *interweave* [1,10]. Os usuários licenciados são normalmente chamados de usuários primários, enquanto que os usuários não licenciados (cognitivos) são referenciados como usuários secundários.

2.3 Protocolo *Underlay*

No protocolo *underlay* os usuários cognitivos têm o conhecimento da interferência causada pelo transmissor secundário em todos os usuários primários. A comunicação concorrente só pode ocorrer se a interferência gerada pelos usuários secundários estiver abaixo de um limite aceitável. A potência de transmissão do usuário secundário é limitada pelo limite de interferência. Em 2002, a FCC propôs a temperatura da interferência como

medida apropriada para a interferência gerada pelos nós secundários na rede primária [2]. A temperatura da interferência é a medida da potência de rádio frequência gerada por outros nós transmissores e fontes de ruído [11]. A potência de transmissão do nó secundário é limitada por dois fatores: potência máxima de transmissão e a potência que gera a máxima interferência no usuário primário, ou seja:

$$P_s < \min \left(\frac{Ti_{max}}{|h|^2}, P_{max} \right), \quad (2.1)$$

em que P_s representa a potência de transmissão, Ti_{max} é a temperatura de interferência máxima aceita pelo usuário primário, $|h|$ o ganho do canal entre o usuário secundário e o usuário primário e P_{max} a potência máxima de transmissão do nó secundário.

Gastpar [12] avalia a capacidade de diferentes canais AWGN com limite de interferência. Sem considerar o efeito do desvanecimento no canal sem fio [13], é mostrado que os limites na potência transmitida e recebida dão origem a fórmulas de capacidade similares para canais AWGN ponto a ponto. Isto deve-se ao fato que a potência recebida no receptor primário é uma versão escalada da potência transmitida. Ghasemi e Sousa [14] avaliam a capacidade ergódica de um sistema em um canal com desvanecimento e limite de interferência e demonstram que para um canal com desvanecimento profundo há um ganho significativo na capacidade do usuário secundário em relação ao canal sem desvanecimento.

2.4 Protocolo *Overlay*

No protocolo *overlay* os usuários cognitivos conhecem os ganhos dos canais e as mensagens dos usuários não cognitivos. Com o conhecimento da mensagem os usuários cognitivos podem cancelar a sua interferência nos usuários licenciados através de técnicas avançadas de comunicação e processamento digital de sinais.

O protocolo *overlay* é baseado na mitigação e cancelamento da interferência. Costa em “Writing on Dirty Paper” [15] aplicou os resultados de Gel’fand e Pinsker [16] para um canal AWGN com um sinal interferente aditivo Gaussiano branco S e mostrou que

escolhendo uma mensagem $U = X + \alpha S$, com valor apropriado de α ($\alpha = \frac{P_s}{(P_s + \sigma^2)}$) é possível atingir a mesma capacidade como se a interferência não estivesse presente, isto é: $C = \frac{1}{2} \log_2(1 + \frac{P_s}{\sigma^2})$, onde X representa a mensagem a ser transmitida e σ^2 a variância do ruído AWGN. Existem duas estratégias para a comunicação usando o protocolo *overlay* [10]:

- Acesso Egoísta (do inglês: *Selfish approach*): Em [17] é considerado um cenário onde o transmissor secundário usa toda a sua potência para transmitir a sua mensagem para o destino secundário. O transmissor secundário usa o conhecimento da mensagem da rede primária para eliminar a sua interferência no destino secundário através do uso da técnica de codificação *dirty paper*. Esta estratégia viola a premissa do rádio cognitivo de que os usuários primários não podem sofrer interferência dos usuários secundários. Entretanto provê a máxima vazão atingida por um usuário secundário.
- Acesso Generoso (do inglês: *selfless approach*): Nesta estratégia o transmissor secundário aloca parte da potência para reencaminhar a mensagem do enlace primário e a restante é usada para encaminhar a sua mensagem. A potência alocada para a mensagem do enlace primário é calculada para que a relação sinal-ruído SNR (do inglês: *Signal-to-Noise Rate*) no receptor primário seja a mesma com e sem o usuário secundário. O incremento da SNR no usuário primário devido à assistência do usuário secundário é equilibrada com a perda de SNR devido à interferência causada pelo transmissor secundário, assim para o receptor primário é como se o usuário secundário não existisse [18]. Através do conhecimento da mensagem do usuário primário, o transmissor secundário elimina a interferência no receptor secundário usando codificação *dirty paper*.

O usuário cognitivo no protocolo *overlay* pode transmitir com qualquer potência. Uma limitação é a dificuldade de se obter a mensagem e todos os ganhos dos canais no transmissor.

2.5 Protocolo *Interweave*

O protocolo *interweave* é baseado no acesso oportunístico, sendo a motivação inicial para as pesquisas com rádio cognitivo. Estudos do FCC [2] mostraram que a maior parte do espectro não é utilizado na maioria do tempo. Estes espaços vazios são referenciados como buracos do espectro. Estes espaços mudam com o tempo e com a localização geográfica e podem ser usados pelos usuários cognitivos. O espectro é distribuído espacialmente, tal que devido à separação física entre transmissor e receptor secundários as atividades do primário detectadas pelo transmissor podem diferir das detectadas pelo receptor. Quanto maior a distância entre os nós do enlace secundário, maior é a incerteza nas detecções. A atividade do usuário primário é dinâmica, ao longo do tempo diferentes segmentos podem estar ativos. Quanto mais dinâmica a atividade do usuário primário, maior a incerteza nas medições. Os usuários não licenciados fazem um sensoriamento do espectro licenciado à procura de faixas de frequência não utilizadas, encontrando-as transmitem nessas frequências sem causar interferência no usuário licenciado. Se por acaso o usuário licenciado começar a transmitir nessa frequência, o usuário secundário deve sair da mesma e procurar uma outra que não esteja sendo utilizada.

O modelo de duas chaves proposto por Jafar e Srinivasa em [19], possibilita que a comunicação ocorra somente se não houver atividade dos usuários primários dentro do raio de interferência do transmissor secundário e do receptor secundário. O modelo do sistema é composto por transmissor secundário, um receptor secundário na presença de usuários primários, o receptor e o transmissor secundários possuem cada um uma chave (s_t e s_r), com dois estados:

- s_t e s_r igual a ‘zero’ indica que há um usuário primário ativo;
- s_t e s_r igual a ‘um’ indica que não há um usuário primário ativo.

Com o conhecimento do estado das chaves no transmissor e no receptor, o limite superior da capacidade é dado por [19]:

$$C_s(P_s) = \mathcal{P}(s_t = s_r = 1) \log \left(1 + \frac{P_s}{\mathcal{P}(s_t = s_r = 1)} \right), \quad (2.2)$$

em que $\mathcal{P}(a)$ é a probabilidade do evento a e $\log(x)$ representa o logaritmo de x na base 2.

A escolha da banda de frequência usada para a comunicação é feita com base no tipo de transmissor e receptor: banda estreita ou banda larga [1, 10]:

- Técnicas de banda estreita: Com transmissor e receptor de banda estreita, a banda de frequência a ser usada para a transmissão pode ser predeterminada ou dinamicamente escolhida baseada na ocupação dos usuários não cognitivos. As técnicas de seleção da frequência de comunicação são classificadas em:
 - Salto de frequência: No salto de frequência, transmissor e receptor cognitivos simultaneamente saltam através de múltiplas frequências de acordo com uma sequência predeterminada. Esta técnica é bem simples pois não explora o passado e presente da disponibilidade dos canais.
 - Rastreamento de frequência: No rastreamento de frequência, o transmissor cognitivo baseado em uma estratégia escolhe uma das bandas de frequência livres para a transmissão. O receptor cognitivo baseado nos sinais recebidos anteriormente, escolhe o canal com maior probabilidade de que transmissor e receptor tenham escolhido o mesmo canal.
- Técnica de banda larga: Conhecida como codificação de frequência (do inglês: *Frequency Coding*), nesta técnica o sistema secundário pode varrer todo o espectro à procura de espaços vazios e se comunicar oportunisticamente através de múltiplas faixas de frequência disponíveis. A codificação de frequência requer a disponibilidade de canal em todas as bandas de frequência antes de cada transmissão.

Resultados de pesquisas apresentados em [20,21] demonstram que, quando a atividade do enlace primário é muito dinâmica, a técnica de salto de frequência supera a de rastreamento em frequência. Porém quando o usuário primário demora para mudar de estado, o rastreamento em frequência pode usar a memória sobre a ocupação do usuário primário e prover uma vazão mais alta que o salto de frequência.

Uma comparação feita em [10] mostra que a vazão alcançada pelo método *overlay* supera a alcançada pelo método *interweave*. Entretanto com o aumento da distância entre primário e secundário, a vantagem do método *overlay* cai rapidamente.

2.6 Protocolo de Rádio Cognitivo Baseado na Exploração de Retransmissões

Em [4], Tannious e Nosratinia propõem um protocolo *overlay* de comunicação cognitiva, em que a rede secundária explora as oportunidades originadas nas retransmissões da rede primária. Em muitos casos há um excesso de informação mútua depois de uma retransmissão, com respeito à mínima informação mútua requerida para decodificação correta, tal que o primário pode tolerar uma certa quantidade de interferência sem perda de desempenho. As redes primária e secundária são compostas por um transmissor e um destino tendo um canal com desvanecimento Rayleigh entre eles, conforme a Figura 2.1.

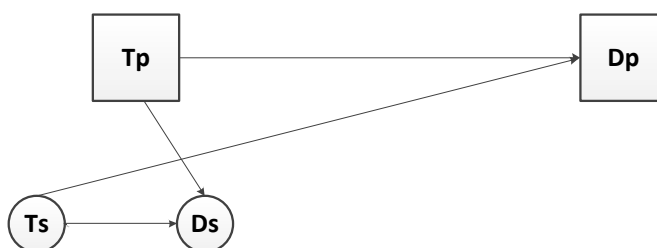


Figura 2.1: Modelo da rede do artigo de Tannious e Nosratinia.

A rede primária usa o protocolo *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ), tal que, em caso de sucesso na decodificação, o destino primário envia um reconhecimento positivo (ACK, do inglês: *Acknowledgement*), caso contrário envia um reconhecimento negativo (NACK, do inglês: *Negative Acknowledgement*) e o transmissor primário faz uma retransmissão. O destino secundário fica monitorando as mensagens do destino primário, ao detectar que o receptor primário enviou um reconhecimento negativo, verifica se conseguiu decodificar corretamente a mensagem da rede primária, em caso de sucesso o destino secundário envia um sinal de *pronto para enviar* para o transmissor secundário. Ao receber um sinal de *pronto para enviar*, o transmissor secundário transmite sua mensagem.

Na Figura 2.2, cujas curvas foram obtidas através dos equacionamentos de [4], analisa-se a vazão do sistema em bits por uso do canal (bpcu, do inglês: *bits per channel use*) em função da taxa esperada de transmissão do enlace secundário R_s .

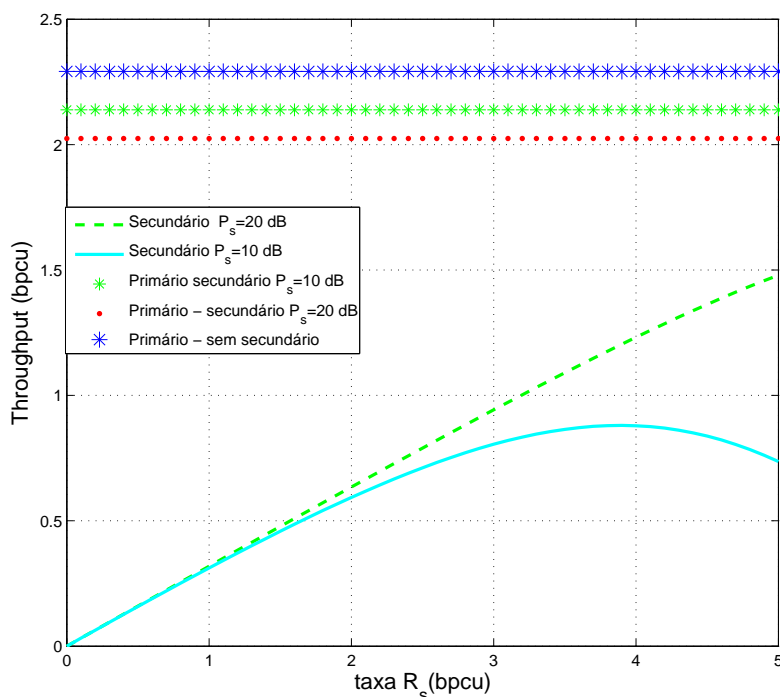


Figura 2.2: Vazão em função da taxa esperada R_s

Observa-se pela Figura 2.2 que a comunicação da rede secundária causa uma perda de desempenho na rede primária. Para diminuir a interferência no destino primário os autores propõem técnicas que pressupõem conhecimento global dos canais pelo transmissor secundário, o que é muito difícil de se conseguir na prática.

2.7 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados o conceito de rádio cognitivo e as principais formas de acesso ao espectro: *underlay*, *overlay* e *interweave*. No próximo capítulo serão apresentados o conceito e os protocolos de comunicação cooperativa, que é a proposta deste trabalho para diminuir a perda de desempenho na rede primária.

CAPÍTULO 3

COMUNICAÇÃO COOPERATIVA

3.1 Introdução

Em redes de comunicação sem fio o desvanecimento por multipercurso causa uma degradação severa da informação transmitida. Para combater esse efeito são usadas em geral técnicas de diversidade. Segundo Goldsmith [22], a probabilidade de múltiplas transmissões independentes da mesma informação sofrerem um desvanecimento profundo é muito baixa. A diversidade espacial com o uso de múltiplas antenas têm atraído interesse desde o surgimento de alguns trabalhos fundamentais [23, 24]. De acordo com o número de antenas no transmissor e no receptor, podemos classificar a diversidade espacial em três formas [25]:

- Diversidade na transmissão: Envolve o uso de múltiplas antenas na transmissão e uma antena na recepção.
- Diversidade na recepção: Envolve o uso de uma antena na transmissão e múltiplas antenas na recepção.
- Diversidade na transmissão e recepção: Envolve o uso de múltiplas antenas na transmissão e recepção.

As principais técnicas usadas para combinar os sinais de diferentes antenas na recepção são [22, 25]:

- Combinação seletiva (SC, do inglês: *Selection Combining*): A antena selecionada é a que tiver o sinal mais forte.
- Combinação de ganho igual (EGC, do inglês: *Equal Gain Combining*): Os sinais das antenas são combinados de forma coerente na recepção mas com o mesmo ganho.

- Combinação de máxima taxa (MRC, do inglês: *Maximal Ratio Combining*): Os sinais das antenas são combinados de forma ponderada para maximizar a relação sinal ruído.

Em [5], foi proposta a utilização de múltiplas antenas nos nós secundários em um cenário semelhante ao do artigo de Tannious e Nosratinia [4]. Na Figura 3.1, feita através dos equacionamentos de [5], analisa-se a vazão alcançada pelas redes primária e secundária em função da taxa esperada do enlace secundário, quando o transmissor secundário utiliza N antenas e o destino M antenas. É considerada uma taxa esperada de transmissão $R_p = 4$ bits/s e uma potência de transmissão do transmissor primário $P_p = 10$ dB, além disso é considerado que para $N = M = 1$ antenas ($P_s = 10$ dB), $N = M = 2$ antenas ($P_s = -1.1$ dB), $N = M = 4$ antenas ($P_s = -6.8$ dB). O destino secundário aplica MRC entre as mensagens das antenas.

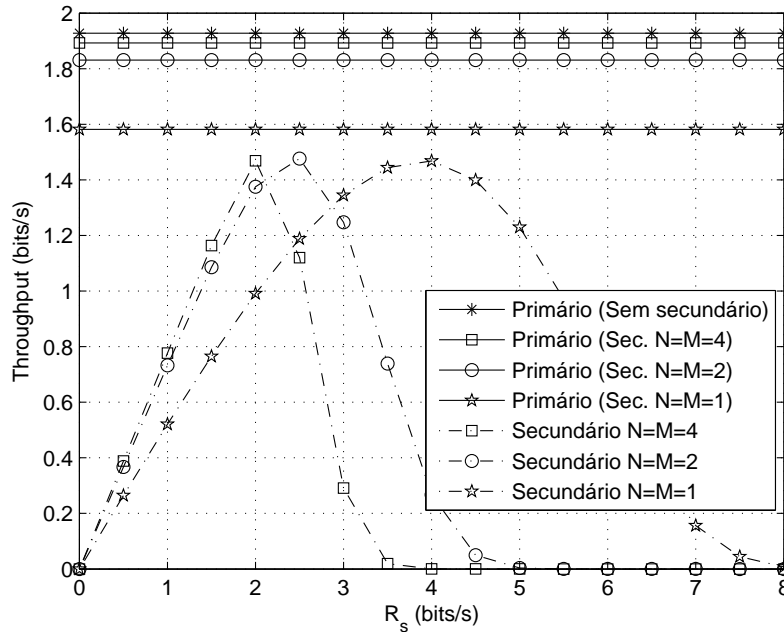


Figura 3.1: Vazão das redes primária e secundária com o uso de múltiplas antenas

O uso de múltiplas antenas possibilita uma grande diminuição na perda de desempenho da rede primária e boas taxas na rede secundária sem necessitar de conhecimento prévio do canal no transmissor secundário. O uso desta técnica é complicado principalmente na área de redes de sensores sem fio, onde o tamanho ou custo do aparelho impossibilitam a

instalação de múltiplas antenas.

Para diminuir a perda de desempenho na rede primária sem a necessidade de múltiplas antenas, é possível usar a comunicação cooperativa [6–8], baseada no conceito do canal *relay* proposto por Van Der Meulen em 1971 [26]. A comunicação cooperativa propõe o compartilhamento das antenas entre os nós transmissor e *relay* com o objetivo de criar um *array* de antenas virtual. A diversidade cooperativa incrementa a capacidade e confiabilidade de uma rede sem fio, tendo nós que auxiliam a transmissão dos demais.

3.2 Canal *relay*

O canal *relay* básico é composto por 3 nós: fonte (S), *relay* (R) e destino (D), conforme a Figura 3.2. O *relay* auxilia a comunicação entre fonte e destino, com o objetivo de obter uma transmissão mais confiável. O nó *relay* pode ser dedicado sem informação própria para transmitir ou qualquer outro nó do sistema contendo as suas próprias informações a serem enviadas.

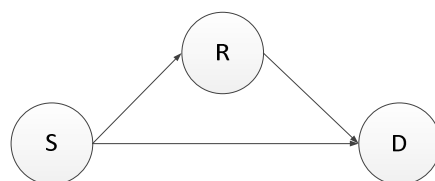


Figura 3.2: Modelo do Canal *relay*.

De acordo com o modo de transmissão o canal *relay* pode ser classificado em duas categorias:

- *Full-duplex*: O *relay* recebe e transmite as informações ao mesmo tempo e na mesma banda de frequência.
- *Half-duplex*: A transmissão e recepção são realizadas usando multiplexação no tempo ou na frequência.

O canal *relay*, segundo o modo de múltiplo acesso, pode ser classificado em duas formas:

- Ortogonal: Fonte e *relay* transmitem de forma multiplexada no tempo, frequência ou código (TDMA, FDMA ou CDMA). No esquema TDMA, no primeiro instante a fonte envia a mensagem em *broadcast* para o *relay* e o destino, e no segundo instante o *relay* atua reencaminhado a mensagem da fonte.
- Superposição: Fonte e *relay* transmitem as informações ao mesmo tempo e na mesma frequência de forma superposta.

O canal *relay* pode ser classificado pela presença ou não de um canal de retorno. Sem um canal de retorno a transmissão ocorre somente no sentido fonte-destino e fonte-*relay*-destino. Quando há um canal de retorno a informação acontece de forma bilateral entre o destino, fonte e *relay*. Este canal é usado para informar sobre a qualidade do enlace e para pedir retransmissões.

3.3 Protocolos de Comunicação Cooperativa

Em Laneman et al. (2004) [6] são apresentados dois protocolos de comunicação cooperativa: amplifica e encaminha (do inglês: *Amplify-and-Forward* (AF)) e decodifica e encaminha (do inglês: *Decode-and-Forward* (DF)). No protocolo AF o *relay* amplifica o sinal e reencaminha para o destino. Com a amplificação, a atenuação do sinal por causa do percurso diminui, entretanto além de amplificar o sinal, o *relay* também amplifica o ruído. Já no protocolo DF, o *relay* tenta decodificar a mensagem da fonte para então recodificar e encaminhá-la para o destino. Com o protocolo DF é possível transmitir com taxas diferentes no transmissor e no *relay*. O protocolo DF possui duas subdivisões: decodifica e encaminha fixo (do inglês: *Fixed Decode-and-Forward* (FDF)) e decodifica e encaminha seletivo (do inglês: *Selective Decode-and-Forward* (SDF)). No protocolo FDF o *relay* sempre encaminha a mensagem para o destino mesmo que não tenha conseguido decodificar, enquanto que no SDF o *relay* só encaminha se não ocorreram erros na decodificação. No caso de haver canal de retorno, é possível ainda usar o protocolo decodifica e encaminha incremental (do inglês: *Incremental Decode-and-Forward*(IDF)) em que o *relay* só encaminha a mensagem para o destino no caso de não haverem erros na decodificação

e que o destino tenha requisitado uma retransmissão.

Na Figura 3.3, feita através de simulações de Monte Carlo, é comparada a BER em função da razão entre a energia de um bit de informação e a densidade espectral de potência de ruído ($\frac{E_b}{N_0}$) dos protocolos cooperativos (FDF e SDF) e da transmissão sem cooperação. Considera-se um canal com desvanecimento Rayleigh, modulação BPSK (do inglês: *binary phase shift keying*), uso do MRC no receptor e coeficiente de perda de percurso igual a 4. O *relay* está posicionado na metade da distância entre a fonte e o destino. Observa-se na Figura 3.3 uma melhora no desempenho em termos de BER para

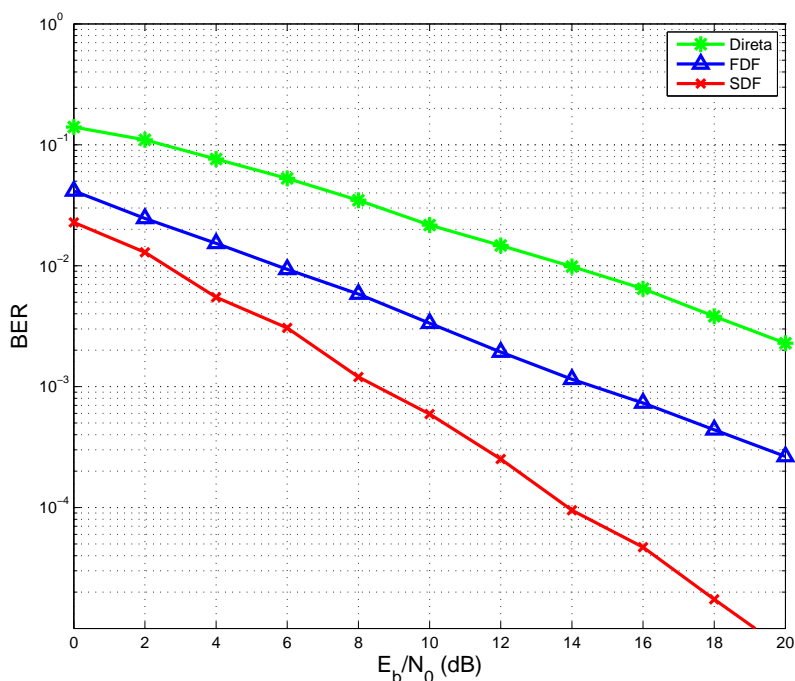


Figura 3.3: Comparação da taxa de erro de bit (BER) pela relação sinal-ruído E_b/N_0 dos protocolos decodifica e encaminha.

o sistema com cooperação, e um ganho de diversidade caracterizado pela mudança na inclinação da curva no protocolo SDF em relação ao protocolo FDF.

3.4 Cooperação Codificada

Cooperação codificada [27–31] é a união dos códigos corretores de erro [32] aos protocolos cooperativos, e pode ser classificada em duas classes:

- Codificação por repetição (do inglês: *Repetition Code (RC)*): Fonte e *relay* utilizam o mesmo codificador.
- Codificação paralela (do inglês: *Parallel Coding (PC)*): Fonte e *relay* usam codificadores diferentes. É mais complexo, pois o destino deve ser capaz de decodificar os dois sinais e combiná-los. Porém o desempenho do protocolo DF pode ser maior com o uso de codificação paralela. [28, 29].

Azarian et al. [33] introduziram o protocolo decodifica e encaminha dinâmico (do inglês: *Dynamic Decode-and-Forward(DDF)*) em que o *relay* escuta a mensagem até o momento em que consiga decodificar. Ao conseguir, encaminha a mensagem para o destino com uma codificação diferente da usada pela fonte. Neste protocolo fonte e *relay* transmitem simultaneamente. Porém, sua maior dificuldade de implementação prática, devido ao tamanho de pacotes variável, limita seu uso.

Em [31], Khormuji e Larsson propõem o esquema repetição parcial (do inglês: *partial repetition*) em que o *relay* usa codificação por repetição, mas repete apenas uma fração fixa da mensagem. O esquema têm um desempenho melhor que os métodos convencionais de repetição e muito próximo do codificação paralela, em uma configuração em que o *relay* está próximo ao destino.

Além disso, várias pesquisas demonstram as vantagens do uso de HARQ em sistemas com cooperação. HARQ é a combinação das técnicas FEC (do inglês: *Forward Error Correction*) e ARQ (do inglês: *Automatic Repeat reQuest*), onde o receptor tenta primeiramente corrigir os erros, caso não consiga corrigi-los solicita uma retransmissão [34]. Valenti e Zhao [35] propõem uma generalização do protocolo HARQ, onde os pacotes de retransmissão não necessitam vir da fonte que o transmitiu, mas de qualquer nó que tenha decodificado corretamente a mensagem na primeira transmissão.

3.5 Múltiplos *relays*

Laneman e Wornell [36] apresentam um esquema AF em que m *relays* ajudam na transmissão da fonte. São usadas $(m + 1)$ canais ortogonais e a potência de transmissão é

igualmente dividida entre os $(m+1)$ nós. A comunicação ocorre em duas fases, na primeira a fonte envia a mensagem para o destino e os *relays*, na fase seguinte todos os *relays* reencaminham o pacote para o destino. O esquema atinge uma ordem de diversidade $(m+1)$. Entretanto, um cenário onde todos os *relays* ajudam na transmissão tem um desempenho inferior, pois o throughput é limitado pelas partições ortogonais dos recursos do sistema. Para resolver essa questão são usadas técnicas para selecionar o melhor *relay*. As principais técnicas de seleção de *relay* são:

- Seleção de melhor *relay*: O *relay* cujo canal, entre ele e o destino, tem a maior relação sinal ruído (SNR) é selecionado [37, 38].
- Seleção do *relay* mais próximo: O *relay* mais próximo do destino é selecionado. Resultados de simulação indicam um ganho significativo na área de cobertura com o uso da mesma potência média de transmissão em relação à transmissão sem cooperação [39].
- Seleção do melhor-pior canal: Para protocolos do tipo dois saltos (do inglês: *dual-hop*) sem comunicação direta entre fonte e destino, para cada *relay* é selecionado o menor ganho de canal entre fonte-*relay* e *relay*-destino, o *relay* com maior ganho entre todos os ganhos mínimo é selecionado para reencaminhar a mensagem [40–42].

Em [43], Jing e Jafarkhani estenderam o uso destas técnicas para um cenário onde mais de um *relay* é selecionado para cooperar, através dos resultados comprova-se que o sistema com seleção de múltiplos *relays* tem um desempenho muito melhor em termos de taxa de erro que o sistema com apenas um *relay*.

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos envolvendo comunicação cooperativa. No próximo capítulo é avaliado o uso de cooperação com múltiplos *relays* com o objetivo de se obter taxas na rede secundária maiores que as atingidas na literatura, sem perda de desempenho na rede primária em um cenário semelhante ao de [4, 5]. São

apresentadas análises considerando o protocolo SDF para o caso em que não há canal de retorno e o protocolo IDF para o caso em que há canal de retorno. Será feita uma comparação de desempenho entre os métodos de codificação por repetição e codificação paralela no método proposto.

CAPÍTULO 4

PROTOCOLO COOPERATIVO DE RÁDIO COGNITIVO EXPLORANDO RETRANSMISSÕES DO PRIMÁRIO

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta o uso de cooperação na rede secundária em um cenário semelhante ao de [4,5]. A cooperação pode ocorrer com o uso de um ou mais *relays*. O objetivo principal está em demonstrar que é possível atingir taxas maiores na rede secundária que as alcançadas na literatura, com uma potência de transmissão muito menor e com uma perda de desempenho mínima na rede primária, sem a necessidade de conhecimento global dos canais pelo transmissor secundário nem do uso de múltiplas antenas.

O capítulo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 4.2 são descritos o modelo do sistema e o protocolo proposto, enquanto que na Seção 4.3 são detalhados os equacionamentos de *outage* e *throughput* para o esquema proposto. Por fim na Seção 4.4 são apresentados os resultados numéricos.

4.2 Modelo do Sistema

Considera-se uma rede primária composta por um transmissor T_p e um destino D_p . O enlace secundário é composto de um transmissor secundário T_s , um *relay* R_s e um destino secundário D_s , conforme a Figura 4.1. O canal entre o transmissor i e o destino j é denotado por h_{ij} e para a amplitude diferentemente de [4,5] onde segue uma distribuição Rayleigh, consideramos uma distribuição Nakagami- m [44] com parâmetro de severidade do canal m_{ij} e energia média λ_{ij} . A distribuição Nakagami- m é uma distribuição mais geral, sendo a distribuição Rayleigh um caso particular quando $m = 1$, para sistemas onde há um pouco de linha de visada considera-se $m > 1$. É considerado uma notação onde $i, j \in \{p, s, r\}$, sendo o índice p reservado ao transmissor ou destino primário, s

ao transmissor ou destino secundário e r ao *relay*. A energia média λ_{ij} é definida como $\lambda_{ij} = \frac{1}{(dn_{ij})^\alpha}$, onde $dn_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_{pp}}$ representa a normalização da distância entre o transmissor i e o receptor j com relação à distância transmissor primário-receptor primário (d_{pp}) e α é o expoente de perda de percurso. A rede secundária se comunica na mesma frequência e espaço de tempo que a rede primária. A densidade espectral de potência do ruído (N_0) é assumida unitária. Além disso, em todas as equações considera-se o logaritmo na base 2.

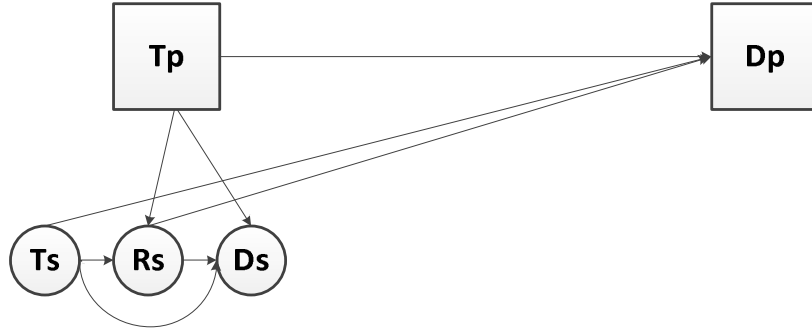


Figura 4.1: Modelo do sistema, contendo transmissor primário T_p , destino primário D_p , transmissor secundário T_s , *relay* R_s e destino secundário D_s .

Assume-se que o sinal recebido pelo nó j , y_{ij} , é:

$$y_{ij} = \sqrt{P_i} h_{ij} x_i + z_j, \quad (4.1)$$

em que P_i é a potência de transmissão do nó i , x_i a mensagem transmitida pelo nó i e z_j é o ruído AWGN.

Probabilidade de *outage* é a probabilidade de falha na comunicação entre os nós i e j . Um evento de *outage* ocorre quando a SNR γ_s é menor que uma SNR mínima γ_0 . A probabilidade de *outage* é dada por [22]:

$$\mathcal{P}_{out} = \mathcal{P}(\gamma_s < \gamma_0) = \int_0^{\gamma_0} p_{\gamma_s}(\gamma) d\gamma, \quad (4.2)$$

onde $p_{\gamma_s}(\gamma)$ representa a função densidade de probabilidade (PDF) de uma variável aleatória γ_s .

A informação mútua $I(X; Y)$ é a medida da quantidade de informação que a variável

aleatória X possui sobre a variável aleatória Y . Portanto podemos dizer que a informação mútua dá a quantidade de incerteza em X que é removida pelo conhecimento de Y e é dada por [22]:

$$I(X; Y) = \sum_{x \in X, y \in Y} p(x, y) \log \left(\frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \right), \quad (4.3)$$

onde $p(x)$ representa a probabilidade da fonte produzir o símbolo x para transmissão, $p(y)$ a probabilidade do símbolo y ser recebido no destino e $p(x, y)$ a probabilidade conjunta de ser transmitido x e de ser recebido y . A capacidade do canal é igual à informação mútua do canal maximizada sobre todas as possíveis distribuições de probabilidade $p(x)$ e é dada por [22]:

$$C = \max_{p(x)} I(X; Y). \quad (4.4)$$

Shannon demonstrou que a capacidade para um canal AWGN é:

$$C = B \log(1 + SNR), \quad (4.5)$$

onde C é a capacidade do canal em bits/s, B é a largura de banda em Hz. A eficiência espectral é obtida a partir da normalização da capacidade, $\mathcal{R} = \frac{C}{B}$ em bits/s/Hz. Isolando a SNR em (4.5), obtém-se a SNR mínima para que ocorra uma transmissão com sucesso, que é dada por:

$$\gamma_0 = 2^{\mathcal{R}} - 1. \quad (4.6)$$

Por sua vez o *throughput* esperado é a taxa líquida de transmissão sem erro, sendo dado por [22]:

$$\mathcal{T} = \mathcal{R}(1 - \mathcal{P}_{out}). \quad (4.7)$$

4.2.1 Protocolo Proposto

Em termos gerais, o protocolo de comunicação proposto pode ser descrito pelas seguintes etapas:

1. O transmissor primário transmite um pacote e os destinos primário e secundário escutam. Se o destino primário decodifica com sucesso a mensagem, um reconheci-

mento positivo (ACK) é transmitido. O transmissor primário está apto a mandar uma nova mensagem. O destino secundário ouve o ACK e descarta o pacote. Entretanto, se o destino primário envia um reconhecimento negativo (NACK), então o transmissor primário faz uma retransmissão.

2. Ao ouvir um NACK o destino secundário verifica se conseguiu decodificar o sinal do transmissor primário. Em caso de sucesso, o destino secundário enviará um “pronto para enviar” (CTS) para o transmissor secundário, que inicia a sua transmissão. A comunicação acontece em duas etapas, conforme a Figura 4.2. Na primeira etapa, ao receber um CTS, o transmissor secundário transmite a sua mensagem para todos os *relays* e o destino secundário. Na segunda etapa entre os *relays* que conseguiram decodificar as mensagens dos transmissores primário e secundário, o que tiver melhor condição instantânea de canal entre ele e o destino secundário, é selecionado para encaminhar a mensagem para o destino secundário¹. Uma forma prática de selecionar o melhor *relay* é calculando um tempo para transmissão inversamente proporcional à condição instantânea do canal, portanto o *relay* que tiver uma melhor condição de canal será o primeiro a transmitir, os outros *relays* ouvem a sua transmissão e descartam o pacote [40]. Caso nenhum *relay* tenha conseguido decodificar a mensagem do transmissor primário, a mensagem do transmissor secundário é descartada. *Relay* e destino secundário podem eliminar a interferência do primário por conhecer sua mensagem.

3. Ambos destinos decodificam as mensagens.

São testadas a codificação por repetição com combinação seletiva (RC-SC), codificação por repetição com combinação de máxima taxa (RC-MRC) e codificação paralela (PC) para combinação da informação no destino secundário. Na RC-SC a mensagem do *relay* escolhido só é utilizada em caso de falha na decodificação da mensagem do link direto, enquanto que na RC-MRC e PC o destino secundário combina as mensagens do transmissor e do *relay*.

¹As comunicações do transmissor secundário e do *relay* precisam ocorrer durante o intervalo da retransmissão do primário.

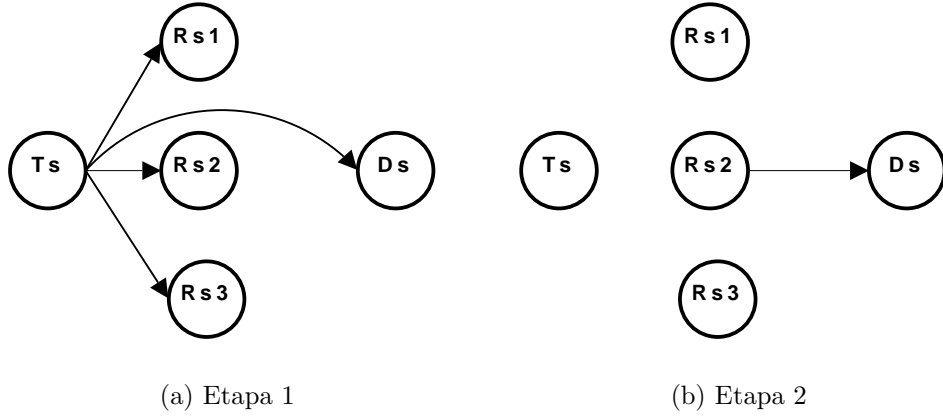


Figura 4.2: Esquema de Comunicação

4.3 Probabilidade de *Outage* e *Throughput*

Nesta seção é detalhado o equacionamento da probabilidade de *outage* e do *throughput* para o esquema proposto. Considera-se primeiro o desempenho do enlace primário quando o enlace secundário está inativo, depois analisa-se o desempenho dos enlaces primário e secundário quando a rede secundária cooperativa proposta está ativa, e por fim é descrito o desempenho no caso de uma rede secundária não cooperativa como proposto por Tannious e Nosratinia [4].

4.3.1 Rede Secundária Inativa

Define-se $\mathcal{P}\{O_{ini}\}$ como sendo a probabilidade de *outage* da transmissão inicial do usuário primário. Considerando canais Nakagami- m , $\mathcal{P}\{O_{ini}\}$ é dada por [45, 46]:

$$\mathcal{P}\{O_{ini}\} = \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{pp}|^2 P_p) < \mathcal{R}_p\} = \frac{\Psi\left(m_{pp}, \frac{(m_{pp}(2^{\mathcal{R}_p}) - 1))}{(\lambda_{pp} P_p)}\right)}{\Gamma(m_{pp})}. \quad (4.8)$$

Onde λ_{pp} denota a energia média do canal h_{pp} , m_{pp} o parâmetro de severidade do canal, P_p a potência de transmissão do transmissor primário e \mathcal{R}_p a taxa esperada da rede primária. A função Gamma incompleta é denotada por $\Psi(a, b) = \int_0^b y^{a-1} \exp(-y) dy$ e a função Gamma completa por $\Gamma(a) = \int_0^\infty y^{a-1} \exp(-y) dy$.

Considerando apenas uma retransmissão, um evento de *outage* ocorre na rede primária

quando a informação mútua acumulada de duas transmissões for menor que uma taxa \mathcal{R}_p . O enlace primário usa o esquema de redundância incremental (IR) entre as duas transmissões e considera-se que os canais não mudam entre as duas transmissões do enlace primário. Denotada por $\mathcal{P}\{O_{ref}\}$, a probabilidade de *outage* do primário após uma retransmissão é dada por:

$$\mathcal{P}\{O_{ref}\} = \mathcal{P}\{2 \log(1 + |h_{pp}|^2 P_p) < \mathcal{R}_p\} = \frac{\Psi \left(m_{pp}, \frac{(m_{pp}(2^{\frac{\mathcal{R}_p}{2}}) - 1))}{(\lambda_{pp} P_p)} \right)}{\Gamma(m_{pp})}, \quad (4.9)$$

O *throughput* esperado \mathcal{T}_{ref} depende de o pacote ter sido recebido em uma ou duas tentativas, e é dado por:

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{ref} &= \mathcal{R}_p \mathcal{P}\{\bar{O}_{ini}\} + \frac{\mathcal{R}_p}{2} \mathcal{P}\{\bar{O}_{ref}, O_{ini}\} \\ &= \mathcal{R}_p \mathcal{P}\{\bar{O}_{ini}\} + \frac{\mathcal{R}_p}{2} \mathcal{P}\{O_{ini}\} \mathcal{P}\{\bar{O}_{ref}|O_{ini}\} \\ &= \mathcal{R}_p \mathcal{P}\{\bar{O}_{ini}\} + \frac{\mathcal{R}_p}{2} \mathcal{P}\{O_{ini}\} \cdot \left(1 - \frac{\mathcal{P}\{O_{ref}\}}{\mathcal{P}\{O_{ini}\}} \right), \end{aligned} \quad (4.10)$$

em que $\mathcal{P}\{\bar{a}\}$ representa a probabilidade complementar do evento a , ou seja, $\mathcal{P}\{\bar{a}\} = 1 - \mathcal{P}\{a\}$. Para obter (4.10) consideramos que:

$$\begin{aligned} \mathcal{P}\{\bar{O}_{ref}|O_{ini}\} &= 1 - \mathcal{P}\{O_{ref}|O_{ini}\} \\ &= 1 - \mathcal{P}\{O_{ini}|O_{ref}\} \frac{\mathcal{P}\{O_{ref}\}}{\mathcal{P}\{O_{ini}\}} \\ &= 1 - \frac{\mathcal{P}\{O_{ref}\}}{\mathcal{P}\{O_{ini}\}}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

4.3.2 Rede Secundária Cooperativa

Neste caso é necessário analisar o desempenho do sistema quando a rede secundária cooperativa está ativa. Para tal, primeiro considere a probabilidade de que o destino

secundário não consiga decodificar a mensagem do primário $\mathcal{P}\{O_{ps}\}$:

$$\mathcal{P}\{O_{ps}\} = \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{ps}|^2 P_p) < \mathcal{R}_p\}. \quad (4.12)$$

Definindo $\mathcal{P}\{U_d\}$ como a probabilidade que o enlace secundário está ativo, ou seja houve falha na transmissão inicial do primário e o destino secundário conseguiu decodificar corretamente a mensagem do primário, então:

$$\mathcal{P}\{U_d\} = \mathcal{P}\{O_{ini}\} \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{ps}\}). \quad (4.13)$$

Por sua vez, a probabilidade de *outage* do primário na presença do secundário $\mathcal{P}\{O_p\}$, é dada por:

$$\mathcal{P}\{O_p\} = \underbrace{\mathcal{P}\{O_p|U_d\} \cdot \mathcal{P}\{U_d\}}_{(A)} + \underbrace{\mathcal{P}\{O_p|\overline{U_d}\} \cdot \mathcal{P}\{\overline{U_d}\}}_{(B)}. \quad (4.14)$$

O termo (A) de (4.14) representa a probabilidade de ocorrência do evento em que houve *outage* no primário e o secundário decodificou corretamente, enquanto que em (B) houve *outage* no primário entretanto o secundário não decodificou corretamente a mensagem do primário.

O termo (A) em (4.14) pode ser re-escrito como:

$$\begin{aligned} \mathcal{P}\{O_p|U_d\} \mathcal{P}\{U_d\} &= \mathcal{P}\{O_p|O_{ini}, \overline{O_{ps}}\} \mathcal{P}\{O_{ini}, \overline{O_{ps}}\} \\ &= \mathcal{P}\{O_p\} \mathcal{P}\{O_{ini}|O_p\} \mathcal{P}\{\overline{O_{ps}}|O_p\}. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Como para ocorrer *outage* no primário é necessário que também tenha ocorrido *outage*

na transmissão inicial, (4.15) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned}
\mathcal{P}\{O_p|U_d\}\mathcal{P}\{U_d\} &= \mathcal{P}\{O_p\}\mathcal{P}\{\overline{O_{ps}}|O_p\} \\
&= \mathcal{P}\{O_p|\overline{O_{ps}}\}\mathcal{P}\{\overline{O_{ps}}\} \\
&= \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{pp}|^2 P_p) \\
&\quad + \left(\frac{1}{2} \log\left(1 + \frac{|h_{pp}|^2 P_p}{1 + |h_{sp}|^2 P_s}\right)\right) \\
&\quad + \frac{1}{2} \log\left(1 + \frac{|h_{pp}|^2 P_p}{1 + |h_{rp}|^2 P_r}\right)\} < \mathcal{R}_p\} \\
&\quad \cdot \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{ps}|^2 P_p) \geq \mathcal{R}_p\}, \tag{4.16}
\end{aligned}$$

em que o segundo termo em (4.16), representa a probabilidade da informação mútua do enlace primário na 1ª transmissão somada à informação mútua da 2ª transmissão (na presença da interferência do enlace secundário) ser menor que a taxa \mathcal{R}_p . A potência de transmissão do transmissor secundário é representada por P_s e P_r denota a potência de transmissão do *relay*.

O termo (B) em (4.14) pode ser re-escrito como:

$$\begin{aligned}
\mathcal{P}\{O_p|\overline{U_d}\}\mathcal{P}\{\overline{U_d}\} &= \mathcal{P}\{O_p, \overline{U_d}\} \\
&= \mathcal{P}\{O_p, \overline{O_{ini}}, \overline{O_{ps}}\} \\
&= \mathcal{P}\{2 \log(1 + |h_{pp}|^2 P_p) < \mathcal{R}_p\} \\
&\quad \cdot \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{ps}|^2 P_p) < \mathcal{R}_p\}. \tag{4.17}
\end{aligned}$$

O *throughput* do primário na presença do secundário \mathcal{T}_p é dado por:

$$\begin{aligned}
\mathcal{T}_p &= \mathcal{R}_p \mathcal{P}\{\overline{O}_{ini}\} + \frac{\mathcal{R}_p}{2} \mathcal{P}\{\overline{O}_p | O_{ini}\} \\
&= \mathcal{R}_p \mathcal{P}\{\overline{O}_{ini}\} \\
&+ \frac{\mathcal{R}_p}{2} (\mathcal{P}\{\overline{O}_p | O_{ini}, \overline{O}_{ps}\} \cdot \mathcal{P}\{\overline{O}_{ps}\} + \mathcal{P}\{\overline{O}_p | O_{ini}, O_{ps}\} \cdot \mathcal{P}\{O_{ps}\}) \\
&= \mathcal{R}_p \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{ini}\}) \\
&+ \frac{\mathcal{R}_p}{2} (\mathcal{P}\{\log(1 + |h_{pp}|^2 P_p) < \mathcal{R}_p \leq \log(1 + |h_{pp}|^2 P_p) \\
&+ \frac{1}{2} \log\left(1 + \frac{|h_{pp}|^2 P_p}{1 + |h_{sp}|^2 P_s}\right) + \frac{1}{2} \log\left(1 + \frac{|h_{pp}|^2 P_p}{1 + |h_{rp}|^2 P_r}\right)\} \\
&\cdot \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{ps}|^2 P_p) \geq \mathcal{R}_p\}) \\
&+ \frac{\mathcal{R}_p}{2} (\mathcal{P}\{\log(1 + |h_{pp}|^2 P_p) < \mathcal{R}_p \leq 2 \log(1 + |h_{pp}|^2 P_p)\} \\
&\cdot \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{ps}|^2 P_p) < \mathcal{R}_p\}). \tag{4.18}
\end{aligned}$$

O primeiro termo em (4.18) representa o caso em que houve transmissão inicial com sucesso no enlace primário; o segundo termo corresponde ao caso em que foi pedida uma retransmissão e o destino secundário decodificou corretamente a mensagem do primário; o terceiro termo representa o caso em que é pedida uma retransmissão mas o destino secundário não conseguiu decodificar a mensagem do primário. Na equação (4.18) observa-se que a rede secundária só causa interferência no destino primário quando ocorre uma retransmissão, e a mensagem do primário foi decodificada corretamente pelo destino secundário².

Definindo-se como $\mathcal{P}\{O_{ss}\}$ e $\mathcal{P}\{O_{sr}\}$ as probabilidades de falha dos enlaces transmissor secundário-destino secundário e transmissor secundário-*relay*, respectivamente, então:

$$\mathcal{P}\{O_{ss}\} = \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{ss}|^2 P_s) < \mathcal{R}_s\}, \tag{4.19}$$

$$\mathcal{P}\{O_{sr}\} = \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{sr}|^2 P_s) < \mathcal{R}_s\}, \tag{4.20}$$

onde \mathcal{R}_s é a taxa esperada da rede secundária.

²Para facilitar o equacionamento é considerado que as distâncias do transmissor secundário e do *relay* para o destino primário são praticamente iguais.

Para o *relay* se comunicar com o destino secundário é necessário que não tenha havido falha no enlace transmissor secundário-*relay* e que tenha sido decodificada corretamente a mensagem do primário no destino secundário assim como no *relay*. Definindo-se como $\mathcal{P}\{O_{pr}\}$ a probabilidade que o *relay* não tenha decodificado corretamente a mensagem do primário e $\mathcal{P}\{U_r\}$, a probabilidade do enlace secundário estar ativado e que pelo menos um *relay* tenha decodificado as mensagens dos transmissores primário e secundário, onde N_r representa o número de *relays* na rede:

$$\mathcal{P}\{O_{pr}\} = \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{pr}|^2 P_p) < \mathcal{R}_p\}, \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{P}\{U_r\} &= \mathcal{P}\{U_d\} \cdot (1 - (1 - (1 - \mathcal{P}\{O_{pr}\})(1 - \mathcal{P}\{O_{sr}\}))^{N_r}) \\ &= \mathcal{P}\{U_d\} \cdot (1 - (\mathcal{P}\{O_{pr}\} + \mathcal{P}\{O_{sr}\} - \mathcal{P}\{O_{sr}\} \cdot \mathcal{P}\{O_{pr}\})^{N_r}). \end{aligned} \quad (4.22)$$

Considera-se a localização dos *relays* muito próximas umas das outras, sendo que as distâncias de cada *relay* ao transmissor primário são aproximadamente iguais, o mesmo ocorre para as distâncias ao transmissor secundário e ao destino secundário. Com o aumento no número de *relays* cooperando a probabilidade $\mathcal{P}\{U_r\}$ tende a $\mathcal{P}\{U_d\}$.

A probabilidade do destino secundário não decodificar corretamente a mensagem vinda do *relay* escolhido é denotada por $\mathcal{P}\{O_{rs}\}$:

$$\mathcal{P}\{O_{rs}\} = \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{rs}|^2 P_s) < \mathcal{R}_s\}. \quad (4.23)$$

O *throughput* do secundário usando cooperação com combinação seletiva é dado por \mathcal{T}_{SDF}^{SC} :

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{SDF}^{SC} &= \frac{\mathcal{R}_s}{2} \cdot \mathcal{P}\{U_d\} \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{ss}\}) \\ &\quad + \frac{\mathcal{R}_s}{2} \cdot \mathcal{P}\{U_r\} \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{rs}\}) \cdot \mathcal{P}\{O_{ss}\}, \end{aligned} \quad (4.24)$$

para o caso em que é usado o protocolo cooperativo SDF, e por \mathcal{T}_{IDF}^{SC} :

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{IDF}^{SC} &= \mathcal{R}_s \cdot \mathcal{P}\{U_d\} \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{ss}\}) \\ &+ \frac{\mathcal{R}_s}{2} \cdot \mathcal{P}\{U_r\} \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{rs}\}) \cdot \mathcal{P}\{O_{ss}\}, \end{aligned} \quad (4.25)$$

quando é utilizado o protocolo IDF.

Para os dois métodos a primeira parte da equação refere-se ao caso em que o destino consegue decodificar a mensagem do transmissor secundário, já a segunda parte refere-se ao caso em que o destino não consegue decodificar a mensagem do transmissor mas decodifica a mensagem do *relay*. O destino secundário aplica combinação por seleção entre as mensagens do transmissor secundário e do *relay*, de modo que um evento de *outage* só ocorre se os enlaces transmissor secundário-destino secundário e *relay*-destino secundário estiverem em *outage* ao mesmo tempo. No primeiro termo da equação do IDF (4.25), a taxa esperada é \mathcal{R}_s e não $\frac{\mathcal{R}_s}{2}$ pois no caso IDF havendo sucesso na decodificação da mensagem no destino secundário (informado via um sinal de *ACK*), o transmissor secundário envia uma nova mensagem no segundo intervalo de tempo enquanto o *relay* fica em silêncio, com isso obtém-se o dobro da eficiência em relação ao SDF [6].

A informação mútua no destino considerando codificação paralela é a soma das informações mútuas, ou seja [47]:

$$I = \log(1 + SNR_{rd}) + \log(1 + SNR_{sd}). \quad (4.26)$$

A probabilidade de *outage* no destino considerando o método de codificação paralela é denotada por $\mathcal{P}\{O_{SPC}\}$ e é dada por [47]:

$$\mathcal{P}\{O_{SPC}\} = \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{rs}|^2 P_s) + \log(1 + |h_{ss}|^2 P_s) < \mathcal{R}_s\}. \quad (4.27)$$

O *throughput* do secundário usando cooperação com codificação paralela \mathcal{T}_{SDF}^{PC} , consi-

derando o método SDF é dado por:

$$\begin{aligned}\mathcal{T}_{SDF}^{PC} &= \left(\frac{\mathcal{R}_s}{2} \cdot \mathcal{P}\{U_d\} \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{ss}\}) \right) + \left(\frac{\mathcal{R}_s}{2} \cdot \mathcal{P}\{U_r\} \cdot \mathcal{P}\{\overline{O_{SPC}}, O_{ss}\} \right) \\ &= \left(\frac{\mathcal{R}_s}{2} \cdot \mathcal{P}\{U_d\} \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{ss}\}) \right) + \left(\frac{\mathcal{R}_s}{2} \cdot \mathcal{P}\{U_r\} \cdot \left(1 - \frac{\mathcal{P}\{O_{SPC}\}}{\mathcal{P}\{O_{ss}\}} \right) \cdot \mathcal{P}\{O_{ss}\} \right),\end{aligned}\tag{4.28}$$

para o método IDF o *throughput* \mathcal{T}_{IDF}^{PC} é dado por:

$$\begin{aligned}\mathcal{T}_{IDF}^{PC} &= (\mathcal{R}_s \cdot \mathcal{P}\{U_d\} \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{ss}\})) + \left(\frac{\mathcal{R}_s}{2} \cdot \mathcal{P}\{U_r\} \cdot \mathcal{P}\{\overline{O_{SPC}}, O_{ss}\} \right) \\ &= (\mathcal{R}_s \cdot \mathcal{P}\{U_d\} \cdot (1 - \mathcal{P}\{O_{ss}\})) + \left(\frac{\mathcal{R}_s}{2} \cdot \mathcal{P}\{U_r\} \cdot \left(1 - \frac{\mathcal{P}\{O_{SPC}\}}{\mathcal{P}\{O_{ss}\}} \right) \cdot \mathcal{P}\{O_{ss}\} \right).\end{aligned}\tag{4.29}$$

Considerando codificação por repetição com MRC, a informação mútua no destino é dada pelo acúmulo de SNR, ou seja [47]:

$$I = \log(1 + SNR_{rd} + SNR_{sd}).\tag{4.30}$$

A probabilidade de *outage* considerando MRC no destino é denotada por $\mathcal{P}\{O_{SMRC}\}$ e é dada por [47]:

$$\mathcal{P}\{O_{SMRC}\} = \mathcal{P}\{\log(1 + (|h_{rs}|^2 + |h_{ss}|^2)P_s) < \mathcal{R}_s\}.\tag{4.31}$$

Os *throughputs* do secundário usando cooperação com MRC, \mathcal{T}_{SDF}^{MRC} e \mathcal{T}_{IDF}^{MRC} , são obtidos a partir de (4.28) e (4.29), substituindo $\mathcal{P}\{O_{SPC}\}$ por $\mathcal{P}\{O_{SMRC}\}$.

4.3.3 Rede Secundária não Cooperativa

Nesta seção é considerado o caso em que a rede secundária não é cooperativa, que vem a ser o esquema proposto por Tannious e Nosratinia em [4]. Assim, a probabilidade de

outage do enlace secundário $\mathcal{P}\{O_s\}$ é:

$$\mathcal{P}\{O_s\} = 1 - (\mathcal{P}\{U_d\} \cdot \mathcal{P}\{\log(1 + |h_{ss}|^2 P_s) \geq \mathcal{R}_s\}), \quad (4.32)$$

e o seu *throughput*, \mathcal{T}_s , é simplesmente:

$$\mathcal{T}_s = \mathcal{R}_s(1 - \mathcal{P}\{O_s\}). \quad (4.33)$$

4.4 Resultados

Esta seção apresenta os resultados numéricos de desempenho do modelo proposto com cooperação no enlace secundário em termos da vazão. Em todas as análises é considerado coeficiente de perda de percurso $\alpha = 4$, distâncias normalizadas com relação à distância transmissor-receptor primário ($d_{pp} = 1$) e potência do transmissor secundário P_s igual à potência do *relay* P_r . Considera-se a localização dos *relays* muito próximas umas das outras, sendo que as distâncias de cada *relay* ao transmissor primário são aproximadamente iguais, o mesmo ocorre para as distâncias ao transmissor secundário e ao destino secundário. As distâncias conforme a Figura 4.3 entre transmissor secundário - destino primário e *relay* - destino primário são aproximadamente iguais, assim como as distâncias transmissor primário - destino secundário e transmissor primário - *relay*.

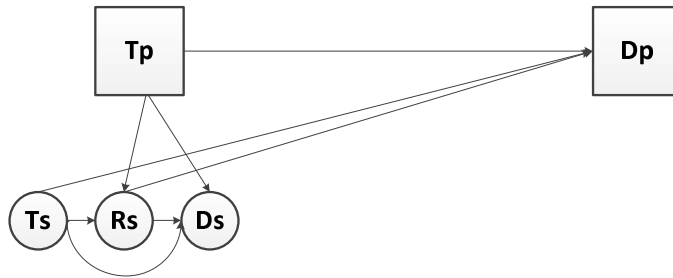


Figura 4.3: Modelo do sistema

4.4.1 Comparação RC-MRC, RC-SC e PC

Na Figura 4.4 é feita uma comparação entre os métodos de codificação por repetição com SC, codificação por repetição com MRC e codificação paralela em termos de *throughput*. É considerado que não há linha de visada ($m = 1$) na rede secundária, que os nós da rede secundária estão próximos do transmissor primário e que há apenas um *relay* cooperando. Os parâmetros de simulação são $\mathcal{R}_p = 4$ bpcu, $\mathcal{R}_s = 4$ bpcu, $P_p = 10$ dB, $\lambda_{pp} = \lambda_{sp} = \lambda_{rp} = 1$, $\lambda_{ps} = \lambda_{pr} = \lambda_{ss} = 2^\alpha$, $\lambda_{sr} = \lambda_{rs} = 4^\alpha$.

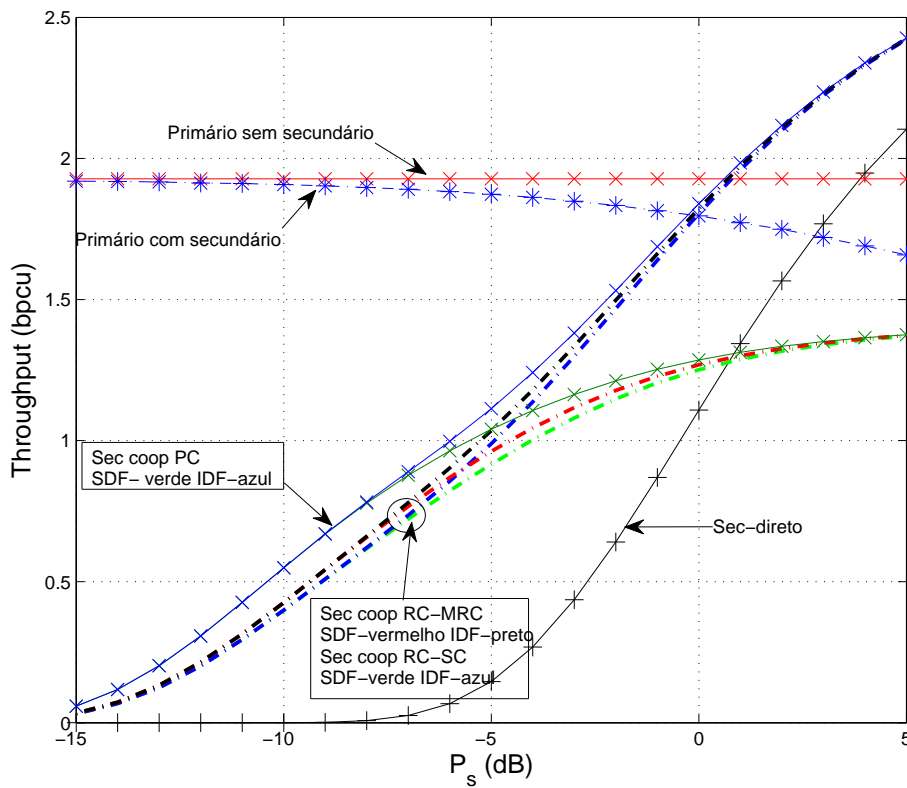


Figura 4.4: Comparação entre os métodos Selection Combining, Parallel Coding e MRC para a rede secundária com um *relay*.

Podemos observar na Figura 4.4 que os métodos com uso de codificação por repetição (Sec coop RC) têm desempenho próximo e que o método de codificação paralela (Sec coop PC) consegue atingir um *throughput* de 0.55 bpcu para uma potência de -10 dB, com uma perda de desempenho muito pequena na rede primária. A transmissão direta (Sec-direto) segue o equacionamento proposto por Tannious e Nosratinia [4]. Na faixa com P_s menor que -10 dB, onde a interferência na rede primária é muito pequena, a

transmissão direta nem começou a atuar.

Como o desempenho do método de codificação paralela foi superior aos métodos com o uso de codificação por repetição, na faixa em que a interferência na rede primária é muito pequena, todas as próximas simulações serão feitas com o uso deste método.

4.4.2 Comparação do Efeito da Linha de Visada no *Throughput*

Na Figura 4.5 é feita uma comparação para avaliar o efeito de se ter um pouco de linha de visada na rede secundária e nos enlaces primário - secundário em termos de *throughput*. Pois como os nós da rede secundária estão bem próximos entre si e do transmissor primário pode-se considerar que eles se enxergam, tendo assim um pouco de linha de visada. É considerado o método de codificação paralela, que os nós da rede secundária estão próximos do transmissor primário e que há apenas um *relay* cooperando. Os parâmetros de simulação são $m = 1$ para todos os canais para a rede sem visada e $m_{pp} = m_{sp} = 1$ e $m_{ss} = m_{sr} = m_{rs} = m_{pr} = m_{ps} = 2$ para a rede com visada, $\mathcal{R}_p = 4$ bpcu, $\mathcal{R}_s = 4$ bpcu, $P_p = 10$ dB, $\lambda_{pp} = \lambda_{sp} = \lambda_{rp} = 1$, $\lambda_{ps} = \lambda_{pr} = \lambda_{ss} = 2^\alpha$, $\lambda_{sr} = \lambda_{rs} = 4^\alpha$.

Observa-se na Figura 4.5 que o sistema com linha de visada atinge um *throughput* de 0.92 bpcu com uma potência do enlace secundário de -10 dB, causando uma interferência mínima no enlace primário. Observando o enlace direto percebe-se que o sistema sem linha de visada tem um desempenho melhor para potências do enlace secundário menores que -2 dB, devido ao fato que para potências pequenas é preciso uma realização muito boa do canal para que a mensagem seja decodificada com sucesso, que não ocorre com tanta frequência com um canal mais estável.

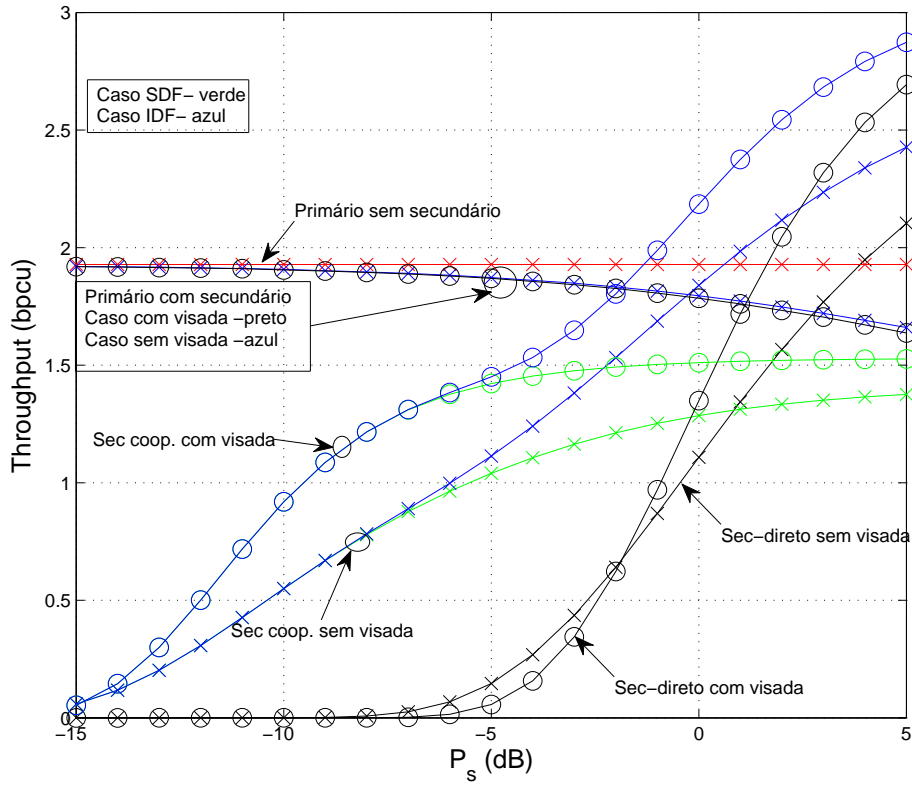


Figura 4.5: Comparação do efeito da linha de visada no *throughput*.

4.4.3 Comparações Variando o Número de *Relays*

4.4.3.1 Comparação Com Linha de Visada

Na Figura 4.6 é feita uma comparação em termos de *throughput* variando o número de *relays* da rede secundária com linha de visada. Considera-se o método de codificação paralela e que os nós da rede secundária estão próximos do transmissor primário. Os parâmetros de simulação são $m_{pp} = m_{sp} = 1$ e $m_{ss} = m_{sr} = m_{rs} = m_{pr} = m_{ps} = 2$, $\mathcal{R}_p = 4$ bpcu, $\mathcal{R}_s = 4$ bpcu, $P_p = 10$ dB, $\lambda_{pp} = \lambda_{sp} = \lambda_{rp} = 1$, $\lambda_{ps} = \lambda_{pr} = \lambda_{ss} = 2^\alpha$, $\lambda_{sr} = \lambda_{rs} = 4^\alpha$.

Através da Figura 4.6, verifica-se que o *throughput* do enlace secundário aumenta com o número de *relays*, estabilizando em $\mathcal{P}\{U_d\} \cdot \frac{\mathcal{R}_s}{2} = 1.53$ bpcu para o caso SDF. Para $P_s = -10$ dB o enlace secundário atinge um *throughput* de 0.92 bpcu com um *relay* e 1.37 bpcu para o sistema com quatro *relays* e com uma interferência mínima no enlace primário.

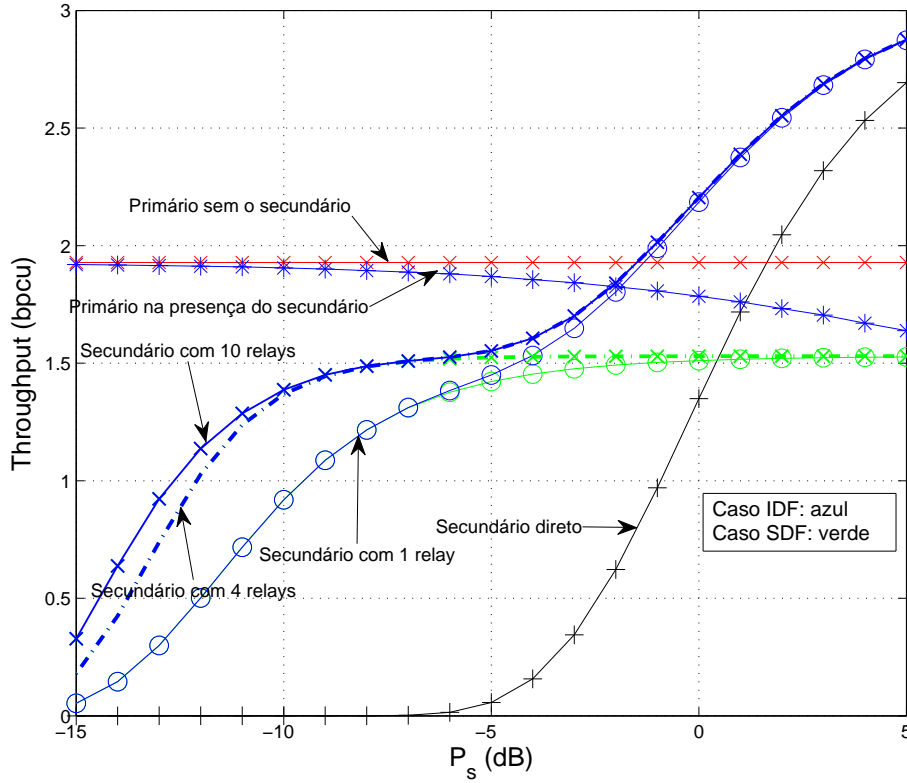


Figura 4.6: Comparação variando número de *relays* com linha de visada

4.4.3.2 Comparação Com Linha de Visada e Com os Nós do Enlace Secundário Mais Próximos

Na Figura 4.7 é feita uma comparação em termos de *throughput* variando o número de *relays* da rede secundária com linha de visada e com os nós do enlace secundário mais próximos, ainda considerado o método de codificação paralela e que os nós da rede secundária estão próximos do transmissor primário. Os parâmetros de simulação são $m_{pp} = m_{sp} = 1$ e $m_{ss} = m_{sr} = m_{rs} = m_{pr} = m_{ps} = 2$, $\mathcal{R}_p = 4$ bpcu, $\mathcal{R}_s = 6$ bpcu, $P_p = 10$ dB, $\lambda_{pp} = \lambda_{sp} = \lambda_{rp} = 1$, $\lambda_{ps} = \lambda_{pr} = \lambda_{ss} = 4^\alpha$, $\lambda_{sr} = \lambda_{rs} = 8^\alpha$.

Na Figura 4.7, para $P_s = -16$ dB o *throughput* do enlace secundário atinge 1.48 bpcu com apenas um *relay* e 2.27 bpcu com 10 *relays*, sem causar interferência no desempenho do enlace primário. Nestas condições o *throughput* estabilizado do enlace secundário é maior que o *throughput* do enlace primário.

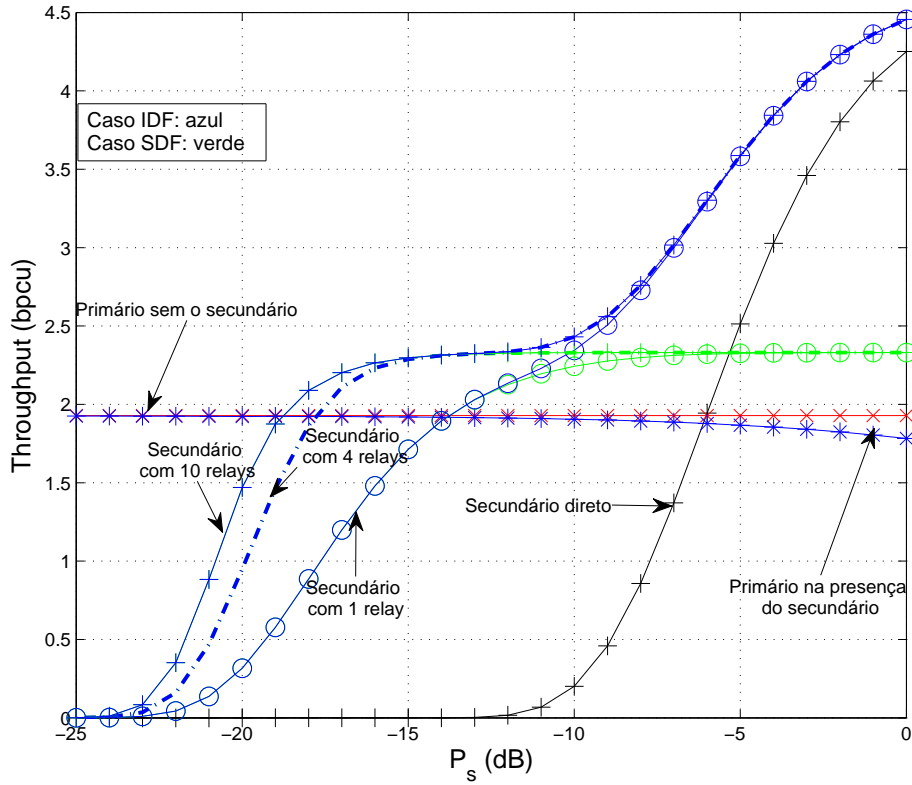


Figura 4.7: Comparação variando número de *relays* com linha de visada e os nós do enlace secundário mais próximos

4.4.4 *Throughput* Para a Rede Com o Enlace Secundário Próximo do Destino Primário

Na Figura 4.8 é feita uma comparação em termos de *throughput* sem linha de visada, considera-se o método de codificação paralela e que os nós da rede secundária estão próximos do destino primário, com apenas um *relay* cooperando. Os parâmetros de simulação são $m = 1$ para todos os canais, $\mathcal{R}_p = 4$ bpcu, $\mathcal{R}_s = 6$ bpcu, $P_p = 10$ dB, $\lambda_{pp} = \lambda_{ps} = \lambda_{pr} = 1$, $\lambda_{sp} = \lambda_{rp} = \lambda_{ss} = 2^\alpha$, $\lambda_{sr} = \lambda_{rs} = 4^\alpha$.

Verifica-se na Figura 4.8 que o desempenho do enlace secundário é muito ruim próximo ao destino primário, devido ao fato que como está mais distante do transmissor primário, fica mais difícil decodificar a sua mensagem e estando próximo ao destino a sua interferência é muito grande.

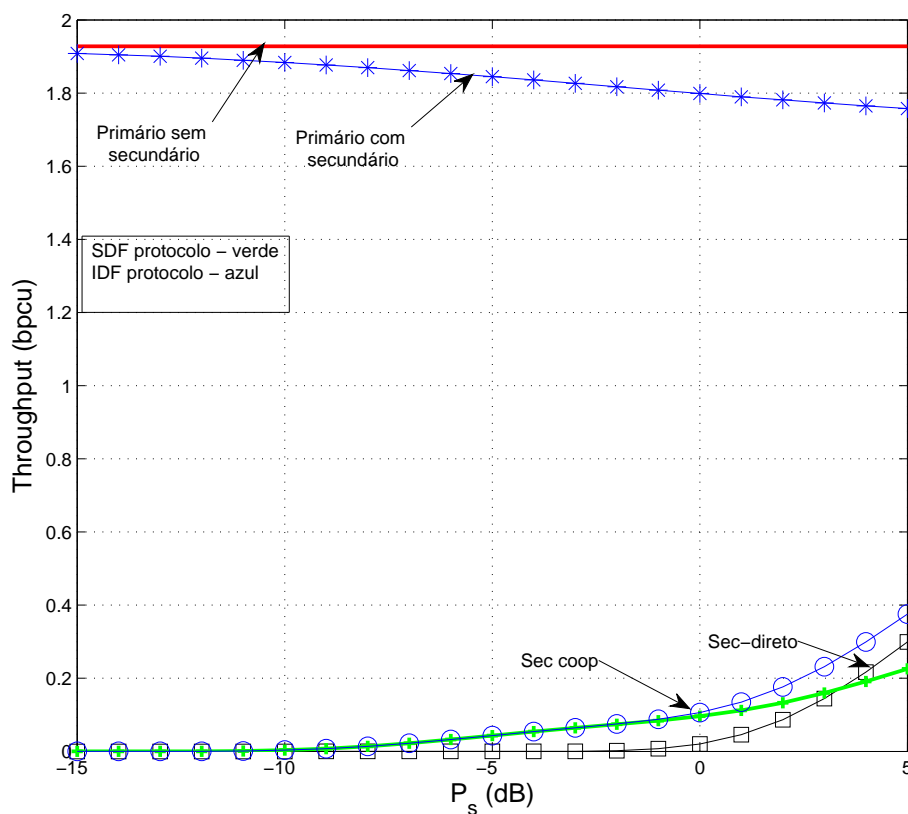


Figura 4.8: *Throughput* para a rede com o enlace secundário próximo do receptor primário

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados o protocolo e equacionamentos de *outage* e vazão para o sistema proposto com cooperação no enlace secundário. Na seção 4.4 foram apresentados os principais resultados da pesquisa, através destes comprovou-se que a melhor configuração para a rede é com os nós da rede secundária próximos do transmissor primário e com linha de visada entre eles. No próximo capítulo, serão feitas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O objetivo principal da dissertação foi propor técnicas com o uso de comunicação cooperativa para conseguir uma transmissão da rede secundária com taxas maiores que as alcançadas na literatura, sem prejudicar significativamente o desempenho da rede primária e sem considerar conhecimento global dos canais pelo transmissor secundário nem múltiplas antenas.

No Capítulo 4 foram feitas comparações em termos da vazão do sistema. Primeiro comparou-se os métodos de codificação da mensagem com apenas um *relay* cooperando e demonstrou-se que com o uso de codificação paralela é possível obter um ganho na vazão do enlace secundário. Na comparação do efeito da linha de visada, verificou-se que para a faixa onde a interferência no enlace primário é mínima, o sistema com linha de visada têm um desempenho melhor, devido em parte à maior probabilidade de sucesso da decodificação da mensagem do usuário primário. Variando-se o número de *relays* a vazão do enlace secundário pode ser maior que a atingida pelo enlace primário, com o mínimo de interferência. Quando o enlace secundário está muito próximo do receptor, o desempenho é muito ruim devido à baixa probabilidade de decodificação do primário e à interferência que a transmissão do enlace secundário causa no receptor primário.

Como sugestão de trabalhos futuros, seria interessante analisar o desempenho quando os nós *relays* estão em distâncias diferentes em relação ao transmissor secundário, onde pode-se usar a seguinte ordem de critérios para a seleção do *relay*:

- Nível de interferência para o enlace primário;
- Ganho médio do canal transmissor - *relay*;
- Ganho instantâneo do canal *relay*-destino.

Outra sugestão seria analisar o desempenho da rede com o uso de controle de potência.

Em redes de sensores é importante considerar a potência consumida pelos nós, por estes serem alimentados por baterias. Dependendo das distâncias e da qualidade dos canais, transmissor e *relay* poderiam variar a potência de transmissão, como consequência pode haver um menor consumo da bateria e redução da interferência no primário. A diminuição da interferência no enlace primário é um dos principais critérios para a comunicação, sendo assim, uma queda no rendimento do enlace secundário pode ser admitida em favor de um maior tempo de vida da rede.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Goldsmith, S. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, “Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 894–914, May 2009.
- [2] “Report of the Spectrum Efficiency Working Group.” FCC, Tech. Rep., Nov. 2002.
- [3] J. Mitola and G. Maguire, “Cognitive radio: making software radios more personal,” *Personal Communications, IEEE*, vol. 6, no. 4, pp. 13–18, Aug 1999.
- [4] R. A. Tannious and A. Nosratinia, “Cognitive radio protocols based on exploiting hybrid ARQ retransmissions,” *IEEE Trans. Wireless. Comm.*, vol. 9, pp. 2833–2841, Sep. 2010.
- [5] R. Souza, “Reducing co-existence penalty of retransmission-based cognitive radio protocol,” *IET Electronics Letters*, vol. 47, no. 6, pp. 409–411, Mar. 2011.
- [6] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [7] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, “User cooperation diversity. Part I. System description,” *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1938, Nov. 2003.
- [8] A. Nosratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, “Cooperative communication in wireless networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 74–80, Oct. 2004.
- [9] S. Haykin, “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Feb. 2005.

- [10] S. Srinivasa and S. A. Jafar, “Cognitive radios for dynamic spectrum access - the throughput potential of cognitive radio: A theoretical perspective,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, pp. 73–79, May 2007.
- [11] P. J. Kolodzy, “Interference temperature: a metric for dynamic spectrum utilization,” *Int. Journal of Network Management*, vol. 16, no. 2, pp. 103–113, Mar. 2006.
- [12] M. Gastpar, “On capacity under receive and spatial spectrum-sharing constraints,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 53, no. 2, pp. 471–487, Feb. 2007.
- [13] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2001.
- [14] A. Ghasemi and E. Sousa, “Capacity of fading channels under spectrum-sharing constraints,” in *IEEE International Conference on Communications, 2006. ICC '06.*, vol. 10, Jun. 2006, pp. 4373–4378.
- [15] M. Costa, “Writing on dirty paper (Corresp.),” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 29, no. 3, pp. 439–441, May 1983.
- [16] S. I. Gel’fand and M. S. Pinsker, “Coding for Channel with Random Parameters,” *Probl. Pered. Inform.*, vol. 9, pp. 19–31, 1980.
- [17] N. Devroye, P. Mitran, and V. Tarokh, “Achievable rates in cognitive radio channels,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 5, pp. 1813–1827, May 2006.
- [18] A. Jovicic and P. Viswanath, “Cognitive Radio: An Information-Theoretic Perspective,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 51, pp. 3945–3958, Sep. 2009.
- [19] S. Jafar and S. Srinivasa, “Capacity limits of cognitive radio with distributed and dynamic spectral activity,” in *IEEE International Conference on Communications, 2006. ICC '06.*, vol. 12, Jun. 2006, pp. 5742–5747.

- [20] —, “Capacity limits of cognitive radio with distributed and dynamic spectral activity,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 3, pp. 529–537, Apr. 2007.
- [21] S. Srinivasa, S. Jafar, and N. Jindal, “On the capacity of the cognitive tracking channel,” in *IEEE International Symposium on Information Theory, 2006*, Jul. 2006, pp. 2077–2081.
- [22] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005.
- [23] S. M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, 1998.
- [24] G. J. Foschini and M. J. Gans, “On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 6, pp. 311–335, Mar. 1998.
- [25] S. Haykin and M. Moher, *Sistemas Modernos de Comunicação Wireless*. Bookman, 2008.
- [26] E. C. V. D. Meulen, “Three-terminal communication channels,” *Advances in Applied Probability*, vol. 3, no. 1, pp. pp. 120–154, 1971.
- [27] A. Stefanov and E. Erkip, “Cooperative coding for wireless networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 9, pp. 1470–1476, Sep. 2004.
- [28] M. Janani, A. Hedayat, T. E. Hunter, and A. Nosratinia, “Coded cooperation in wireless communications: space-time transmission and iterative decoding,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, no. 2, pp. 362–371, Feb 2004.
- [29] B. Zhao and M. Valenti, “Distributed turbo coded diversity for relay channel,” *IEE Electron. Letter*, vol. 39, pp. 786–787, May 2003.

- [30] T. Hunter, S. Sanayei, and A. Nosratinia, “Outage analysis of coded cooperation,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 2, pp. 375 – 391, Feb. 2006.
- [31] M. N. Khormuji and E. G. Larsson, “Cooperative transmission based on decode-and-forward relaying with partial repetition coding,” *IEEE Trans. Wireless. Comm.*, vol. 8, pp. 1716–1725, Apr. 2009.
- [32] S. Lin and D. J. Costello, *Error Control Coding, Second Edition*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2004.
- [33] K. Azarian, H. El Gamal, and P. Schniter, “On the achievable diversity-multiplexing tradeoff in half-duplex cooperative channels,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 51, no. 12, pp. 4152 –4172, Dec. 2005.
- [34] S. B. Wicker, *Error control systems for digital communication and storage*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1995.
- [35] B. Zhao and M. Valenti, “Practical relay networks: a generalization of hybrid-arq,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 1, pp. 7 – 18, Jan. 2005.
- [36] J. Laneman and G. Wornell, “Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415 – 2425, Oct. 2003.
- [37] Y. Zhao, R. Adve, and T. J. Lim, “Improving amplify-and-forward relay networks: Optimal power allocation versus selection,” in *IEEE International Symposium on Information Theory, 2006*, Jul. 2006, pp. 1234 –1238.
- [38] ———, “Symbol error rate of selection amplify-and-forward relay systems,” *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no. 11, pp. 757 –759, Nov. 2006.
- [39] A. Sadek, Z. Han, and K. Liu, “A distributed relay-assignment algorithm for cooperative communications in wireless networks,” in *IEEE International Conference on Communications, 2006. ICC '06.*, vol. 4, Jun. 2006, pp. 1592 –1597.

- [40] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, “A simple cooperative diversity method based on network path selection,” *IEEE J. Select. Areas Comm.*, vol. 24, pp. 659–672, Mar. 2006.
- [41] A. Müller and J. Speidel, “Relay selection in dual-hop transmission systems: Selection strategies and performance results.” in *IEEE International Conference on Communications, 2008. ICC '08.* IEEE, May. 2008, pp. 4998–5003.
- [42] J. Lee, H. Wang, J. G. Andrews, and S. Member, “Outage probability of cognitive relay networks with interference constraints,” *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 10, no. 2, pp. 390–395, Feb. 2011.
- [43] Y. Jing and H. Jafarkhani, “Single and multiple relay selection schemes and their achievable diversity orders,” *IEEE Trans. Wireless. Comm.*, vol. 8, pp. 1414–1423, Mar. 2009.
- [44] N. Nakagami, “The m -distribution, a general formula for intensity distribution of rapid fading,” in *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, W. G. Hoffman, Ed. Oxford, England: Pergamon, 1960.
- [45] Z. Wang and G. Giannakis, “A simple and general parameterization quantifying performance in fading channels,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 8, pp. 1389 – 1398, Aug. 2003.
- [46] S. Savazzi and U. Spagnolini, “Cooperative space-time coded transmissions in nakagami- m fading channels,” in *IEEE Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07.*, Nov. 2007, pp. 4334 –4338.
- [47] G. Caire and D. Tuninetti, “The throughput of hybrid-arq protocols for the gaussian collision channel,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, no. 5, pp. 1971–1988, Jul. 2001.