



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Informática

Graduação em Engenharia da Computação

**Classificação e Análise Comparativa de Protocolos de Controle
de Acesso ao Meio para Rádios *Full-Duplex***

Wilton Pereira Santos Santana

Trabalho de Graduação

Recife, Pernambuco

Julho de 2018

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Informática

Wilton Pereira Santos Santana

**Classificação e Análise Comparativa de Protocolos de Controle de
Acesso ao Meio para Rádios *Full-Duplex***

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia da Computação.

Orientador: Renato Mariz de Moraes

Recife, Pernambuco

Julho de 2018

Dedico este trabalho a Deus e minha família.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por sempre ter me acompanhado, mesmo eu não sendo merecedor e sem o qual nada sou.

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais e irmãos, os quais sempre me apoiaram, sendo, portanto, fundamentais na conclusão desta jornada.

A todos os amigos, por toda motivação e maravilhosos momentos compartilhados, dos quais sempre me recordarei com alegria.

Ao Professor Renato Mariz de Moraes pela incrível paciência, apoio, orientações e oportunidade de aprender cada vez mais.

Finalmente, a todas as pessoas que um dia compartilharam conhecimento contribuindo em meu desenvolvimento.

”Há apenas duas maneiras de viver a vida.

Uma, é como se nada fosse um milagre.

A outra, é como se tudo fosse.”

—ALBERT EINSTEIN

Resumo

Por muito tempo acreditava-se que era impossível desenvolver um rádio capaz de transmitir e receber dados simultaneamente em uma mesma faixa de frequência, tal limitação se sustenta no fato que em tais condições estas operações se auto interferem. Consequentemente, os rádios operavam em um modo denominado *half-duplex* no qual tal unidade de comunicação ora transmitia ora recebia informação, mas nunca realizava ambos papéis simultaneamente. Recentemente foi possível implementar um modelo de rádio intitulado *full-duplex* capaz de atuar como transmissor e receptor simultaneamente em uma mesma frequência. Este avanço tecnológico traz consigo grandes promessas de melhorias para a comunicação sem fio em geral, como, o aumento da capacidade de transmissão, a redução de atrasos e segurança além da possível solução para problemas clássicos, como o Problema do Terminal Escondido, Problema do Terminal Exposto e Detecção de Colisão de pacotes. Porém, ao transmitir e receber simultaneamente, surgem novos desafios para elaboração de técnicas de comunicações sem fio no aspecto de acesso ao meio, isto é, como propor novos protocolos MAC que viabilizem a comunicação entre várias estações que desejam compartilhar o meio comum sem causar interferência umas nas outras de forma a regular o uso do canal de comunicação. Este trabalho visa abordar os protocolos MAC que se favorecem da tecnologia *full-duplex* em banda com o intuito de aprimorar, de algum modo, a comunicação entre os dispositivos participantes. Foram estudados os principais protocolos de modo a identificar os importantes avanços e limitações encontrados por protocolos *full-duplex* MAC. Adicionalmente, informações pertinentes aos protocolos estudados foram compactadas em uma detalhada tabela para uma consulta comparativa. Por fim, são apresentados tópicos relevantes de pesquisa que ainda estão em aberto na literatura. Como resultado, foi possível identificar quais avanços foram alcançados com o método *full-duplex* de acesso ao meio, as limitações dos protocolos estudados e tópicos de pesquisa que ainda estão em aberto nessa área.

Palavras-chave: Camada MAC; Classificação de protocolos; Comparação de protocolos; Rádios e Evolução dos protocolos MAC; *Full-duplex*; Protocolos MAC; Protocolos MAC para *Full-duplex*.

Abstract

For a long time it was assumed that it was impossible to develop a radio capable of transmitting and receiving data simultaneously in the same frequency. Such limitation is based on the fact that for those conditions these operations cause self interference. Therefore, radios operate in a *half-duplex* mode in which the device could only transmit or receive information. Recently, it was possible for scientists to implement a radio model named *full-duplex* that is able to act as a transmitter and receiver at the same time in the same frequency. This approach comes with evidences of improvements in wireless communications, such as, throughput increase, delay decrease and network security, besides the potencial solution to classical problems, such as Hidden Terminal Problem, Exposed Terminal Problem and Collision Detection. However, transmitting and receiving simultaneously leads to new challenges, such as how to come up with new wireless communication techniques for medium access. In other words, how to propose new MAC protocols that enables communication among many stations that desire to share the same medium without interfering in each other in order to manage the communication channel usage. This work aims to review the MAC protocols which use the full-duplex technology in their favor in order to improve, somehow, the network's devices communication. In this way, the main protocols in the state-of-the-art were studied in order to identify advances and limitations found by the full-duplex MAC protocols. Additionally, relevant information about those protocols were summarized in a table for a comparative analysis. Finally, we present a discution regarding the most relevant open issues in the literature. As a result we were able to identify advances that were acquired with *full-duplex* technology of medium access, limitations and issues that have not been covered yet.

Keywords: Evolutionary evaluation of MAC protocols; Full-duplex MAC protocols; Full-duplex Radio; MAC layer; Protocols classification; Protocols comparison.

Lista de Tabelas

4.1	Valores do reconhecimento <i>full-duplex</i>	40
5.1	Análise comparativa dos Protocolos	50
5.1	Análise comparativa dos Protocolos (continuação)	51
5.1	Análise comparativa dos Protocolos (continuação)	52
5.1	Análise comparativa dos Protocolos (continuação)	53
5.1	Análise comparativa dos Protocolos (continuação)	54

Lista de Figuras

2.1	Mecanismos de propagação.	8
2.2	Redes de Telefonia Celular.	10
2.3	Redes Wi-Fi.	11
2.4	Redes ad hoc.	13
2.5	O problema do terminal escondido.	16
2.6	O problema do terminal exposto.	17
2.7	Modo de comunicação um do CSMA/CA	18
2.8	Mecanismo de comunicação do modo dois do CSMA/CA	19
2.9	Mecanismo de comunicação do modo dois do CSMA/CA	19
3.1	Requisitos de cancelamento de autointerferência para rádios <i>full-duplex</i>	22
3.2	Duas configurações de antenas possíveis em terminais <i>full-duplex in-band</i>	22
3.3	Terminal <i>Full-Duplex</i> em banda.	23
3.4	Técnica de cancelamento de antenas.	24
3.5	Diferentes topologias em redes <i>full-duplex</i>	29
4.1	Estrutura de Pacote em Sahai <i>et al.</i>	32
4.2	Diagrama de transmissão bidirecional do Sahai <i>et al.</i>	32
4.3	Diagrama de transmissão unidirecional do Sahai <i>et al.</i>	33
4.4	Esquemático de troca de pacotes do protocolo Janus.	35
4.5	Esquemático de troca de pacotes em modo <i>full-duplex</i> do protocolo proposto por Duarte <i>et al.</i>	36
4.6	Esquemático de troca de pacotes em modo <i>full-duplex</i> do protocolo proposto por Tang e Wang	37
4.7	Comunicação <i>full-duplex</i> do protocolo ContraFlow.	39
4.8	Comunicação <i>full-duplex</i> assimétrica do protocolo ContraFlow.	39

4.9	Comunicação <i>full-duplex</i> bidirecional do protocolo proposto por Goyal <i>et al.</i> . . .	40
4.10	Comunicação <i>full-duplex</i> unidirecional baseada no destino do protocolo proposto por Goyal <i>et al.</i>	41
4.11	Comunicação <i>full-duplex</i> unidirecional baseada na fonte do protocolo proposto por Goyal <i>et al.</i>	41
4.12	Comunicação <i>full-duplex</i> do protocolo FD-MAC.	42
4.13	O problema da colisão em transmissões secundárias.	43
4.14	Esquemático de troca de pacotes em modo <i>full-duplex</i> do protocolo proposto por Duarte <i>et al.</i>	44
4.15	Comunicação <i>full-duplex</i> bidirecional do protocolo RTS/FCTS.	45
4.16	Comunicação <i>full-duplex</i> Unidirecional do protocolo RTS/FCTS.	46
4.17	Comunicação <i>full-duplex</i> do protocolo FD-MMAC.	47
4.18	Comunicação <i>full-duplex</i> FD-MMAC em múltiplos canais.	47

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura do Documento	4
2	Fundamentos em Redes sem Fio	6
2.1	Comunicação sem fio	6
2.1.1	Modelo de Propagação	7
2.1.2	Mecanismos de Propagação	7
2.1.3	Desvanecimento	8
2.1.4	Ruído	9
2.2	Redes sem Fio	9
2.2.1	Redes Infraestruturadas	9
2.2.2	Redes sem Infraestrutura	11
2.3	Controle de Acesso ao Meio	13
2.4	Protocolos MAC	13
2.4.1	O Problema do Terminal Escondido	15
2.4.2	O Problema do Terminal Exposto	16
2.5	O protocolo CSMA	17
2.6	O protocolo CSMA/CA	18
3	Fundamentos em <i>Full-Duplex</i>	20
3.1	Rádios <i>Full-Duplex</i>	20
3.1.1	Isolamento ou Cancelamento Passivo	23
3.1.2	Cancelamento Ativo	25

3.2	Redes <i>Full-Duplex</i>	26
3.2.1	Topologia	28
4	Classificação dos Protocolos MAC <i>Full-Duplex</i>	30
4.1	Protocolos para Redes Infra-estruturadas	31
4.2	Protocolos para Redes <i>Ad Hoc</i>	38
5	Análise Comparativa dos Protocolos e Problemas em Aberto	48
5.1	Comparação dos Protocolos	48
5.2	Problemas em Aberto	56
6	Conclusão	60
	Referências Bibliográficas	62

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo introdutório serão apresentados a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, bem como, o objetivo e a estrutura deste documento.

1.1 Motivação

A habilidade de comunicação sem contato pessoal vem fomentando a imaginação da humanidade desde a primeira demonstração do rádio realizado por Guglielmo Marconi na Inglaterra. Em tempos contemporâneos, a tecnologia sem fio continua a nos encantar com sucessivos avanços. Suas inúmeras aplicações encontram-se presentes em diversos segmentos e ambientes tornando-se cada vez mais ubíqua na sociedade moderna, revolucionando, assim, o modo como a humanidade troca informação.

As primeiras redes locais sem fio (*WLANs*, do inglês *Wireless Local Area Networks*), surgiram em 1980 e, logo, enfrentaram uma grande resistência por parte dos usuários. Muito se deveu ao fato dos altos custos desta rede na época e ao fato que estas apresentavam velocidades muito menores que as redes cabeadas. Na época atual, padronizada pelo protocolo IEEE 802.11, as redes sem fio ganharam maior espaço devido a mobilidade que se traduz em livre locomoção e também ao aumento das taxas de transmissão. Em muitos casos, esses fatores levaram os usuários a substituir a conexão cabeada por uma sem fio em lares, escritórios, centros comerciais, indústrias entre outros ambientes. Este fato se reflete no crescente número de dispositivos capazes de se comunicar com a Internet por meio de protocolos de comunicação para redes sem fio, como é o caso dos *notebooks*, celulares e *tablets*.

Adicionalmente, a comunicação móvel provida de uma infraestrutura é capaz de levar co-

nectividade a um nível municipal. Nas últimas décadas, os sistemas de telefonia celular tiveram grandes avanços, um dos principais trata-se de propiciar acesso à Internet. Apenas no Brasil, estima-se que o número de usuários móveis é de 235 milhões em 2018 de acordo com a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel)[1]. Além disso, recentemente, o significativo aumento do poder de processamento destes aparelhos com aplicativos úteis a custos acessíveis levaram usuários a substituir sistemas mais complexos como o computador, em virtude da praticidade de um telefone móvel.

Com o advento da miniaturização dos rádios, irromperam também novos conceitos, como a Internet das Coisas (*IoT*, do inglês *Internet of Things*) e Cidades Inteligentes. Tais concepções visam conectar diferentes aparelhos a rede global de Internet a fim de possibilitar conectividade aos mesmos. Com origens nas então consolidadas redes de sensores sem fio, estes novos paradigmas apresentam previsões de contar com 24 bilhões de dispositivos conectados a Internet em 2020 [2].

Como consequência do progresso das tecnologias sem fio, também surgem diferentes problemas. O elevado número de dispositivos sem fio conectados, por exemplo, acarreta na obstrução do meio resultando na impossibilidade de comunicação dando origem ao problema conhecido como a “selva de Wi-Fi“, que é alvo de vários estudos, muitos dos quais buscam soluções em algoritmos adaptativos, a título de exemplo, o Chamaleon-MAC [3], no qual os dispositivos se ajustam a utilização do meio.

Ademais, o expressivo aumento de usuários e dispositivos em associação com as diversas aplicações existentes demandam cada vez mais capacidade de transmissão das redes sem fio. Estes fatores motivam engenheiros e cientistas a aprimorar diferentes aspectos das redes sem fio como eficiência da rede, capacidade de transmissão e a garantia de acesso ao meio a todos os nós da rede, ou seja, justiça entre os dispositivos.

Com o advento da Internet das Coisas e cidades inteligentes, estudiosos são levados a investigar particularidades das redes de sensores sem fio. Do ponto de vista destas redes, eficiência energética é um dos maiores desafios para os desenvolvedores. Estes geralmente focam na otimização do consumo da CPU e dos circuitos transmissores e receptores visto que estes são os maiores consumidores de bateria do sistema [4]. Destes, o maior responsável pelo consumo em um nó da rede é a transmissão de dados [4, 5].

Por várias décadas, os esforços em se aprimorar as propriedades de uma rede sem fio estiveram concentrados principalmente em diferentes segmentos da comunicação, a título de exemplo,

modulação do sinal, acesso ao meio de transmissão, roteamento de pacotes, entre outros. Porém, quanto ao modelo de comunicação, pressupunha-se que era impraticável alterar o modo de comunicação de um dispositivo sem fio a fim de transmitir e receber dados simultaneamente em uma mesma faixa de frequência. Esta suposição se respalda no fato que realizar tais operações conjuntamente provocam um efeito de auto-interferência, em virtude da interferência oriunda do próprio sinal transmitido no circuito receptor dificultando, assim, a recepção do sinal de interesse. Consequentemente, os rádios operam tradicionalmente em um modo denominado *half-duplex*, no qual alterna entre a transmissão e recepção de informações provenientes do canal.

Embora o processo para atenuar os efeitos da auto-interferência demonstre ser laborioso sendo necessária a redução em $110dB$ do sinal transmitido, recentemente alguns trabalhos mostraram que a implementação de um rádio *full-duplex* é factível ao se aplicar técnicas avançadas de cancelamento e supressão de sinal para mitigar a auto-interferência. Dentre as principais vantagens mencionadas nos estudos de Radunović *et al.* [6], um dos precursores em comunicação *full-duplex*, encontra-se possíveis soluções para problemas clássicos da comunicação sem fio, como o Problema do Terminal Escondido [7] e o Problema do terminal Exposto [8].

Outro benefício oriundo do emprego de uma tecnologia *full-duplex* envolve a redução pela metade do espectro utilizado nas comunicações móveis [9]. Adicionalmente, executar uma retransmissão de pacotes em modo de comunicação *full-duplex* implica em uma considerável diminuição em atrasos fim-a-fim, visto que um nó é capaz de retransmitir um pacote enquanto ocorre a recepção de outro. Além do mais, operar com tais rádios permitiria o reconhecimento instantâneo na troca de pacotes de dados. Deste modo, é possível inferir que o emprego destes rádios reduziria o consumo energético, o que vem a ser uma grande vantagem principalmente no que se refere as redes de sensores sem fio.

Apresentadas as vantagens descritas anteriormente, é importante notar que explorar todas as possibilidades de um rádio *full-duplex* requer um protocolo adequado a tal comunicação de forma que faz-se necessário realizar um levantamento do estado-da-arte no que se refere a estes protocolos de forma a propor mecanismos que se beneficiem ao máximo de tais rádios.

1.2 Objetivos

Este trabalho teve como objetivo geral realizar uma revisão bibliográfica, classificação e análise qualitativa e evolutiva dos principais protocolos *full-duplex* de Controle de Acesso ao Meio (MAC, do inglês *Medium Access Control*), sobretudo aqueles voltados às redes de sensores sem fio e redes locais sem fio.

São objetivos específicos deste trabalho:

1. Classificar os protocolos de acordo com o tipo de rede objetivado (redes com e sem infraestrutura);
2. Reunir as principais informações dos protocolos abordados com o intuito de facilitar o acesso a tais informações;
3. Realizar uma comparação entre os protocolos estudados;
4. Indicar as principais limitações desses protocolos, além de apontar possíveis linhas de pesquisa de forma a colaborar na elaboração de novos e mais eficientes protocolos.

Com isto, este trabalho intenciona, acima de tudo, fornecer uma documentação capaz de servir de referência no estudo e elaboração de protocolos destinados ao modo de comunicação *full-duplex*.

1.3 Estrutura do Documento

O restante deste documento está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta alguns conceitos fundamentais relevantes para a comunicação sem fio de modo a facilitar o entendimento dos problemas encontrados nos protocolos abordados nos capítulos seguintes deste trabalho.

O Capítulo 3 aborda os conceitos referentes aos rádios *full-duplex* a fim de familiarizar o leitor quanto a este novo modelo de transmissão. Neste capítulo há uma breve apresentação da camada físicas dos rádios bem como algumas dificuldades encontradas na elaboração de tais rádios. Como poderá ser observado, vários dos fundamentos abordados neste capítulo também serão usados nos demais capítulos deste trabalho.

Posteriormente, no Capítulo 4, apresentamos os protocolos MAC que procuram se beneficiar das vantagens de uma camada física guarnecida de um rádio com recepção e transmissão

simultânea. Neste capítulo, tais protocolos são classificados de acordo com as características mais diversas para em seguida reunir as características em uma tabela apresentada no capítulo seguinte.

No Capítulo 5, como mencionado anteriormente, as principais propriedades dos protocolos estudados anteriormente serão agrupadas em uma tabela, de modo a proporcionar um acesso mais fácil a informação. Nesta tabela, os pontos positivos bem como pontos negativos encontrados, em cada um dos protocolos abordados, também, serão expressos.

Os principais desafios e contribuições encontrados na elaboração dos protocolos *full-duplex* de acesso ao meio são discutidos no Capítulo 5. Esta argumentação é realizada na esperança de que a mesma venha a auxiliar a elaboração de novos e mais eficientes protocolos destinados a rádios *full-duplex*.

No Capítulo 6 as conclusões finalizam o trabalho ressaltando as principais brechas a serem preenchidas por futuros protocolos. Os principais resultados também são lembrados neste capítulo, assim como são apresentados os possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos em Redes sem Fio

O conceito de uma rede sem fio surgiu em 1971 com o sistema ALOHNET. Fruto da necessidade da Universidade do Havaí de conectar sua rede de computadores, a qual se apresentava dispersa ao longo do arquipélago havaiano. O sistema era capaz de conectar os computadores dos vários campis do arquipélago havaiano via transmissão de pacotes de rádios [10]. Desde então, as redes sem fio têm concebido um grande avanço tecnológico revolucionando o modo e a velocidade com a qual trocamos informações.

Neste capítulo apresentamos alguns conceitos importantes no estudo de redes sem fio. Iniciamos o capítulo explanando alguns princípios no que se refere a comunicação sem fio. Em seguida, as redes sem fio e os protocolos destinados a tais redes são abordados.

2.1 Comunicação sem fio

Comunicação sem fio é por definição a transferência de dados sem uma conexão cabeada. Apesar de poder ser realizado de diferentes formas de propagação de ondas eletromagnéticas, a maioria dos sistemas modernos se beneficiam da propagação por rádio frequência (RF) ou sinais de micro-ondas [11].

Diferente do meio cabeado, as comunicações via rádio são bem mais desafiadoras e não oferecem uma maneira fácil de serem analisadas [12]. Esta seção aborda algumas das propriedades e características de tais sistemas.

2.1.1 Modelo de Propagação

Devido ao meio, a intensidade de um sinal de rádio é atenuado à medida que transmissor e receptor se afastam. É possível prever a potência do sinal recebido através de vários modelos. O modelo mais simples é o modelo do espaço-livre que considera um caminho sem obstáculos entre o transmissor e o receptor, ou seja, uma linha-de-visada direta, do inglês *line-of-sight* (*LOS*). O modelo toma como base a equação do espaço-livre de Friis [12] dada por

$$P_r = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \frac{1}{L} P_t, \quad (2.1)$$

em que P_t e P_r são as potências em Watts da transmissão e recepção, respectivamente, R é a distância entre a antena transmissora e a antena receptora. A variável L indica o nível de perdas do sistema que não está relacionado com a propagação ($L \geq 1$). Um valor de $L = 1$ indica que o sistema não tem perdas devido a hardware [12]. As componentes G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissora e receptora, respectivamente. λ é o comprimento de onda dado por

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega_c}, \quad (2.2)$$

sendo, f a frequência em Hertz da onda portadora, c a velocidade de propagação da luz no vácuo em metros por segundo com o valor de 3×10^8 e ω_c a frequência da portadora em radianos por segundo.

É importante notar que a Eq. (2.1) ocorre em casos ideais de transmissão e por isso deve ser interpretada como a máxima potência possível na recepção do sinal. Em situações reais a potência do sinal entregue é muito menos devido a inúmeros fatores como: descasamento de impedância das antenas, descasamento de polarização do sinal em uma das antenas e efeitos de desvanecimento e multi-caminhos (*multipath*) [11].

2.1.2 Mecanismos de Propagação

Geralmente três mecanismos de propagação são considerados como responsáveis pelo maior impacto em propagação do sinal em sistemas de comunicações sem fio, são eles:

- *Reflexão*: O efeito de reflexão ocorre quando a onda de rádio esbarra em um objeto com o tamanho muito maior em relação ao comprimento-de-onda [12].
- *Difração*: A difração transcorre quando a onda é obstruída por superfícies que consiste

de formas irregulares. As ondas eletromagnéticas se curvam nas arestas de tais objetos se propagando em diferente direções [12].

- *Espalhamento*: O espalhamento ou difusão do sinal acontece quando a onda eletromagnética encontra objetos de tamanho muito menores em comparação ao seu comprimento-de-onda. O espalhamento também ocorre onde o número de obstáculos por volume é elevado, ou seja, em contato com superfícies rugosas [12].
- *Sombreamento*: O sombreamento é causado por objetos entre o transmissor e receptor que atenuam o sinal pela absorção, reflexão, espalhamento e difração [5].

Apesar de serem abordados de modo separado os mecanismos de propagação ocorrem em conjunto como visto na Fig. 2.1. Também é possível observar que tais mecanismos são os principais autores dos efeitos multi-caminho.

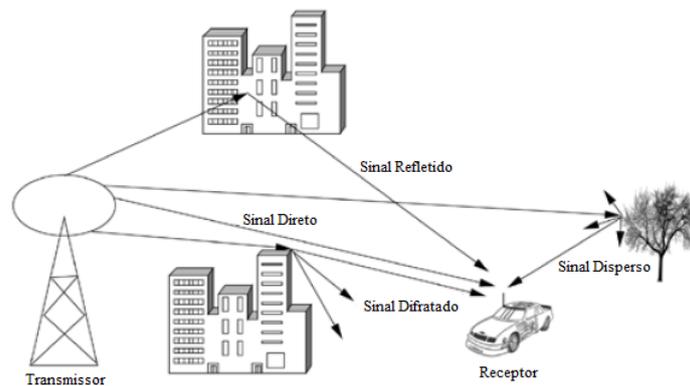


Figura 2.1: Mecanismos de propagação (adaptado de [13]).

2.1.3 Desvanecimento

O desvanecimento do sinal se refere a flutuação na força do sinal recebido pelo nó destinatário. O desvanecimento ocorrer em duas escalas: larga escala e pequena escala [12].

Desvanecimento em Larga Escala (large-scale fading) está relacionado com a flutuação da amplitude, fase ou atrasos em grandes distâncias entre o transmissor e o receptor [12]. As perdas ao longo do percurso (*path loss*) bem como desvanecimento por sombreamento são as principais.

Desvanecimento em Pequena Escala (small-scale fading) está relacionado com rápidas flutuações da potência do sinal em curtas distâncias ou curtas durações. O desvanecimento está relacionado principalmente com os efeitos da interferência causada por múltiplas versões do

mesmo sinal. As várias cópias do sinal se somam de forma a variar a amplitude e fase da onda de propagação no receptor e são, essencialmente, consequências dos multi-caminhos [12].

2.1.4 Ruído

Em ambientes reais os sinais também sofrem distorções ao longo do caminho por interferências indesejadas e perturbações. Estas interferências são aleatórias e imprevisíveis de fontes externas e internas ao sistema. Interferências externas podem ser causadas por transmissões em canais próximos, acionamento de sistemas elétricos e de fontes naturais como radiações solares e tempestades elétricas. Interferência internas são causadas pelo movimento natural das partículas elétricas, irradiações aleatórias entre outros [14]. No caso dos Rádios *full-duplex*, a principal interferência interna é a proveniente do próprio circuito transmissor.

É possível notar que devido às varias atenuações do meio, o sinal tem sua potência continuamente reduzida com a distância enquanto o ruído é acumulado pelo caminho. A relação entre a potência do sinal transmitido e a potência do ruído na recepção de dados é um fator de qualidade em sistemas de comunicação em geral recebendo o nome de relação sinal-ruído, do inglês *signal-to-noise ratio (SNR)*, sendo definida como a relação entre a potência do sinal e a potência do ruído [14].

2.2 Redes sem Fio

As redes sem fio são, geralmente, categorizadas quanto à existência ou ausência de uma infraestrutura. Esta infraestrutura tem a função de gerenciar as transmissões da rede, dar suporte aos dispositivos e prover acesso a outras redes, como, por exemplo, redes cabeadas. Nesta seção as duas arquiteturas mais frequentes em redes sem fio serão abordadas.

2.2.1 Redes Infraestruturadas

Redes sem fio infraestruturadas são caracterizadas pela presença de uma estação base (BS, do inglês *Base Station*), ou como são mais conhecidas em redes WLAN, pontos de acesso (AP, do inglês *Access Point*). As estações bases têm a função de prover, via conexão sem fio, acesso à rede cabeada aos dispositivos móveis associados à rede sem fio [5]. Adicionalmente, os pontos de acesso empregam o papel de controle centralizado da rede sendo responsáveis pelo escalonamento e gerenciamento de energia. Em várias redes infraestruturadas as estações

base também são responsáveis pelo processo de *handoff*. Esta operação ocorre quando um dispositivo móvel se afasta de uma estação em direção a outra de modo que o sinal da primeira diminui enquanto o da segunda estação se eleva. Exemplos de redes infra-estruturadas incluem o sistema de telefonia celular, redes Wi-Fi e Bluetooth.

No sistema de telefonia celular, a região de cobertura é fracionada em áreas menores hexagonais denominadas células sendo estas unidades gerenciadas por uma BS. Este cenário é representado na Figura 2.2. As estações rádio base conectam os vários usuários móveis de uma célula às estações de comutação (MSC, do inglês *Mobile Switching Center*) [12]. Além de gerenciar os dispositivos, estas estações também são encarregadas de localizar as estações móveis em sua vasta rede, este processo é conhecido como *paging* [15]. Visto que este sistema emprega a reutilização de frequências, na qual células adjuntas atuam em frequências distintas [16], o sistema de telefonia celular se estabeleceu como uma rede altamente eficaz no uso do espectro de transmissão.

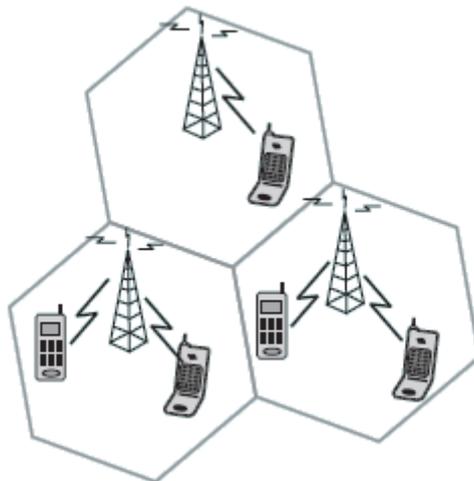


Figura 2.2: Redes de Telefonia Celular (adaptado de [17]).

As redes Wi-Fi [18] são, geralmente, redes com infraestrutura. Baseada no protocolo IEEE 802.11 [19], estas redes locais sem fio (WLANs, do inglês *Wireless Local Area Networks*), surgiram na década de 1990 com o principal propósito de estender as redes cabeadas [20]. Análogo à comunicação móvel, o ponto de acesso e os dispositivos associados ao mesmo formam uma célula chamada de Conjunto Básico de Serviços (BSS, do inglês *Basic Service Set*) observado na Figura 2.3. Com um alcance de aproximadamente 100m os pontos de acesso, assim como, no sistema de celulares, são responsáveis pela coordenação da comunicação entre os elementos da rede atuando como uma interface entre os dispositivos sem fio e a Internet.

Em contraste às redes indicadas anteriormente, a tecnologia Bluetooth [21] foram projetadas para a comunicação de baixo consumo energético e a uma curta distância entre dispositivos [22]. Esta eficiência energética a tornou atrativa para aplicações em Internet das Coisas sendo atualizada nas duas últimas versões e baseia-se no protocolo IEEE 802.15.1 [23].



Figura 2.3: Redes Wi-Fi (adaptado de [17]).

Com efeito da centralização do controle, em muitas redes infraestruturadas, os dispositivos da rede devem encaminhar seus pacotes de dados ao ponto de acesso a fim de que este transmita para o destinatário, e são geralmente ditas de único salto, diferente das redes *ad hoc* as quais requerem retransmissão dos pacotes ao longo da rede. Esta propriedade de salto único as permitem alcançar maiores taxas de transmissão, uma redução no atraso fim-a-fim, além da redução de colisão entre pacotes em relação as redes sem infraestrutura.

Em contrapartida, as redes infraestruturadas se apresentam mais custosas de modo que em alguns casos tornam-se inviáveis. Em determinadas situações é simplesmente impraticável munir a rede de tais infraestruturas, como ocorre em monitoramentos florestais, subaquáticos ou em combates militares.

2.2.2 Redes sem Infraestrutura

Em contraste às redes infraestruturadas, as redes *ad hoc* não necessitam da assistência de uma infraestrutura, ou seja, estas redes são compostas de dispositivos capazes de se autoconfigurar, dinamicamente, formando uma rede, como pode ser observado na Figura 2.4. Em razão da inexistência de uma infraestrutura, os nós da rede devem exercer papéis de controle e demais tarefas essenciais para a rede [5]. Nestas redes os nós podem se comunicar diretamente entre si, contanto que estejam no alcance de comunicação. Uma vez que um dispositivo não possua acesso direto ao destinatário, o nó depende da retransmissão por meio dos demais elementos

da rede para se comunicar com o nó destino. Esta propriedade concede às redes *ad hoc* a característica de uma rede de múltiplos saltos.

As redes de sensores sem fio (*WSN*, do inglês *Wireless Sensor Networks*) são grandes exemplos de redes *ad hoc*. Formada por várias unidades, essas redes operam em ambientes hostis e são, geralmente, projetadas para durar o máximo de tempo sem a necessidade de intervenção humana, pois, em muitos casos é inviável realizar esta intervenção sendo, portanto, fundamental que os dispositivos sejam energeticamente eficientes. Fruto do investimento, da DARPA em redes *ad hoc* para fins táticos militares, as redes de sensores atualmente suportam uma ampla gama de aplicações como rastreamento de alvos, monitoramento ambiental e de saúde, sistemas autômatos de controle e exploração de ambientes hostis [24, 25].

Um outro paradigma de redes *ad hoc* são as redes *ad hoc* móveis (MANETS, do inglês *Mobile Ad hoc Networks*) representadas na Figura 2.4. As MANETS são formadas por diferentes dispositivos sem fio móveis como celulares, notebooks, *tablets* e etc. Nestas redes, os dispositivos trabalham de forma conjunta de modo a prover funcionalidades necessárias da rede. Deste modo, como em toda rede *ad hoc* não há a necessidade de uma infraestrutura apesar de em algumas aplicações estas redes estarem conectadas a redes móveis ou a Internet [17].

Um conceito emergente de redes *ad hoc* são as Redes Veiculares (*VANETS*, do inglês *Vehicular Ad hoc Networks*). VANETS são um caso especial das MANETS na qual os veículos, mesmo em movimento, podem se auto-organizar de modo a formar uma rede e trocar informações entre os veículos, mesmo em locais onde a infraestrutura é ausente [26]. O principal objetivo de destas redes é prover informações a seus usuários de forma mais eficiente e avisar sobre engarrafamentos, perigos na pista, condições climáticas, estabelecimentos e etc.

Devido às capacidades de autoconfiguração e auto-organização, as redes *ad hoc* apresentam a vantagem de serem altamente flexíveis sendo, então, interessantes para situações emergenciais. Além do mais, a ausência de uma infraestrutura resulta em uma rede de custos mais baixos. Verifica-se, também, que a falta de um ponto de falha central (como é no casos das redes infraestruturadas) torna tais redes altamente robustas e, portanto, ideais para situações pós-desastres e aplicações militares [5].

Por outro lado, as redes *ad hoc* detêm taxas de transmissão mais baixas em relação às redes com infraestrutura. A falta de uma unidade central de controle também acentua a taxa de colisão de pacotes. Dependendo do protocolo empregado, ocorre também um aumento de sobre-escuta do canal e/ou sobrecarga nos pacotes de dados. Além disto, as retransmissões

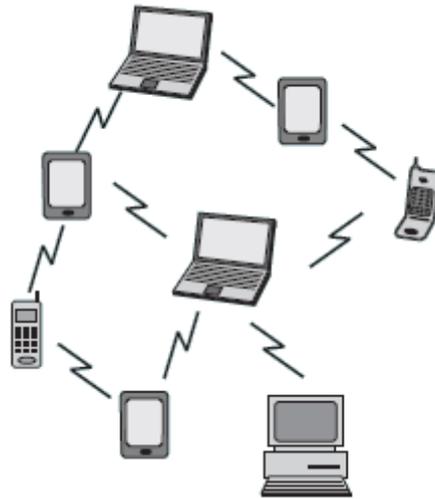


Figura 2.4: Redes ad hoc (adaptado de [17]).

entre os nós implicam em maiores atrasos fim-a-fim e ainda maior consumo energético.

2.3 Controle de Acesso ao Meio

Em redes sem fio, um dos principais tópicos estudados trata-se da camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC, do inglês *Medium access control*). O controle de acesso ao meio é uma importante técnica para as redes em que o meio é compartilhado, assegurando a operação bem-sucedida da rede [27]. Os protocolos destinados a esta camada da rede empregam o papel fundamental de garantir a distribuição justa e eficiente da largura de banda. Visto que os elementos das redes sem fio são geralmente alimentados por baterias é crucial para a camada de controle ter consciência do consumo energético, Portanto, uma importante função dos protocolos MAC é evitar a colisão e interferências entre as transmissões de dados uma vez que isto implica em retransmissões e por sua vez maior consumo energético nos dispositivos [28].

2.4 Protocolos MAC

Um protocolo MAC é definido como um conjunto de regras que regula o acesso dos dispositivos ao meio compartilhado permitindo a comunicação de forma ordenada e eficiente entre os elementos da rede [29]. Elaborar protocolos MAC para redes sem fio envolve balancear diferentes propriedades, geralmente, não é possível aprimorar uma métrica sem que outra seja

deteriorada. Em [29], um apanhado das principais métricas comparativas em protocolos sem fio são comentadas, entre elas:

- Vazão, do inglês *throughput*: É a fração da capacidade do canal utilizada para transferência de dados. Geralmente maximizar a vazão de dados é o principal objetivo dos protocolos MAC.
- Justiça: Os protocolos devem realizar uma divisão justa da banda de modo que nenhum nó da rede seja priorizado. Essa propriedade pode ser re-definida para protocolos com suporte a multimídia em que a justiça envolve a divisão proporcional da banda.
- Atraso, do inglês *delay*: O atraso é definido como o tempo médio que um pacote permanece na fila do protocolo MAC, ou seja, o tempo entre a requisição de uma transferência e a efetivação da transferência dos dados. Como esta métrica varia não somente de acordo com o protocolo empregado, mas também com as características do tráfego é essencial que ao compará-la os protocolos utilizem as mesmas condições.
- Estabilidade: Como em redes cabeadas, os protocolos MAC sem fio também devem ser capazes de resistir a picos de cargas maiores que a capacidade máxima de transmissão mesmo que a longo prazo as aplicações requeiram um volume de comunicação bem menor que esta capacidade.
- Robustez contra desvanecimento: Como abordado no início do capítulo os desvanecimentos em meio são aleatórios, além disso, esse meio é bastante propenso a erros. Esses fatores podem tornar instável a comunicação entre dois nós da rede. Dessa forma, os protocolos MAC devem ser resistentes a tais falhas evitando instabilidades em seu comportamento.
- Eficiência Energética: Como a maioria dos dispositivos sem fio são equipados com baterias, é importante que os protocolos tenham consciência de seus consumos energéticos e poupem energia. Esta propriedade é bem acentuada em redes de sensores sem fio na qual em muitas é difícil ou impossível de realizar a troca de baterias dos sensores.
- Suporte a Multimídia: Com a crescente demanda das aplicações por transmissões de áudio e vídeo em adição aos dados, é necessário que os protocolos MAC ofereçam suporte as diferentes aplicações multimídia se empenhando, também, em tratar as diferentes restrições de atrasos destas.

Em contrapartida alguns trabalhos, como em [27, 30], alguns fatores que deterioram as métricas listadas anteriormente são comentadas:

- Colisões: Colisões ocorre quando um ou mais nós transmitem simultaneamente interferindo entre si. Colisões resultam num gasto de energia adicional para retransmissão.
- Sobrecarga, do inglês *overhead*: Geralmente, protocolos MAC reservam uma fração de pacote, ou mesmo, pacotes inteiros para realizar o controle do acesso ao meio. A sobrecarga é então definida como todo conteúdo sem dados de aplicação que é transmitido e/ou recebido em um protocolo [30]. O uso demasiado desse controle pode representar a perda de capacidade, aumento de latência e piora na eficiência energética.
- Sobre-escuta, do inglês *overhearing*: A sobre-escuta se dá quando um nó recebe e processa pacotes não destinados a ele, mesmo que esta atividade seja realizada de forma parcial. A sobre-escuta representa principalmente um gasto energético, visto que o dispositivo poderia polpar energia ao não receber o pacote que não lhe é destinado [30].
- Escuta Ociosa, do inglês *idle listening*: Em vários protocolos os nós devem sensorar o canal para receber dados endereçados a si. Quando não há tráfego no canal diz-se que o nó está em modo de escuta ociosa. Este fator pode representar de 50% a 100% do consumo energético de um protocolo [27].

2.4.1 O Problema do Terminal Escondido

O problema do terminal escondido, do inglês *Hidden Terminal Problem*, foi inicialmente observado por Tobagi e Kleinrock em 1975 [7] e decorre quando dois nós que não se escutam desejam transmitir simultaneamente estando ao menos um dos receptores ao alcance de ambos e, portanto, sofre interferência proveniente da transmissão adicional de um deles.

O problema do terminal escondido é ilustrado na Figura 2.5, na qual se observa que os terminais A e C não podem se comunicar entre si, porém o terminal B pode se comunicar com ambos. Ao tentar identificar uma transmissão em andamento, o nó A não obterá sucesso caso a origem da transmissão seja um nó na área tracejada, a exemplo, nó C. Desta forma, diz-se que os nós A e C são terminais escondidos entre si.

O problema do terminal escondido contribui para o aumento do número de colisões de pacotes e, conseqüentemente, aumento do consumo energético em razão das retransmissões

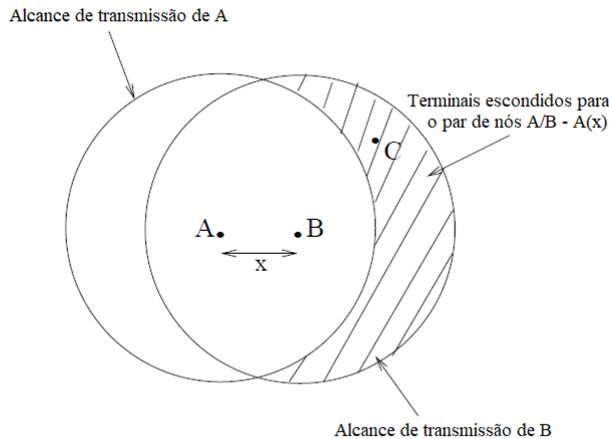


Figura 2.5: O problema do terminal escondido (adaptado de [8]).

adicionais. Por esse motivo vários estudos e protocolos foram elaborados na esperança de mitigar seus efeitos, provando-se, portanto, um grande obstáculo para os protocolos de controle de acesso a meio sem fio.

Uma das estratégias mais adotadas trata-se de um mecanismo de negociação denominado *handshake* em que a transmissão de dados é precedida pela troca de pacotes de controle. Entretanto, esta troca pode originar o problema do terminal exposto [8].

2.4.2 O Problema do Terminal Exposto

O problema do terminal exposto decorre da inviabilidade de um nó realizar uma transmissão devido ao nó receptor estar indisponível uma vez que uma possível transmissão já está em andamento em sua área de alcance.

O nó D, na Figura 2.6, é impedido de transmitir dados para o nó C, mesmo que esta não interfira na transmissão realizada do nó A em direção ao nó B. Isto ocorre visto que ao ter conhecimento que o nó B possui uma comunicação em curso, devido a escuta dos pacotes de controle trocados entre o nó A e B, o nó C entra em um estado de inatividade, termo conhecido em inglês como *backoff* a fim de evitar interferir na transmissão. Deste modo, o nó D não pode estabelecer uma conexão com o nó C posto que este não responde a troca de pacotes de controle.

Terminais expostos são problemáticos, pois resultam em um aumento de latência ocasionada pela redução no número de transmissões realizadas de forma simultânea.

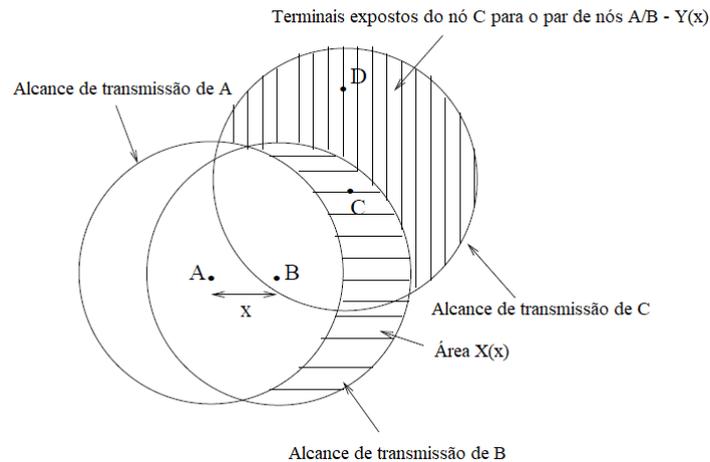


Figura 2.6: O problema do terminal exposto (Adaptado de [8]).

2.5 O protocolo CSMA

O protocolo CSMA (do inglês, *carrier sense multiple access*) [31], visa reduzir o número de colisões de pacotes de dados ao restringir a vulnerabilidade do protocolo a um tempo máximo (τ) o qual é equivalente ao atraso máximo de propagação de um pacote [32]. No CSMA os dispositivos buscam identificar se o meio está livre por sensoriamento do canal antes de iniciar uma transmissão. Com isso, o protocolo evita a colisão de pacotes visto que nenhum nó transmitirá no decorrer de uma comunicação. Ao identificar que o canal está ocupado, os autores sugerem três variantes que podem ser empregadas: não-persistente, 1-persistente e p-persistente.

Em sua versão 1-persistente, desde que o canal esteja livre, o nó continua a comunicação até que ocorra uma colisão. Após transcorrer a perda de pacotes por colisão, os nós envolvidos entram em estado de espera por um tempo aleatório antes de buscar o acesso ao meio. Diferentemente da versão anterior, em modo não-persistente, ao identificar que o meio está ocupado o nó aguarda por um tempo aleatório antes de executar o sensoreamento do canal outra vez. A variante p-persistente procura balancear entre as versões anteriores. Neste modo, após verificar que não há uma transmissão em andamento, o nó inicia a comunicação com uma probabilidade p e, conseqüentemente, espera por um tempo aleatório com uma probabilidade de $(1 - p)$ antes de tentar novamente [32].

2.6 O protocolo CSMA/CA

O protocolo CSMA/CA (do inglês, *carrier sense multiple access*), é uma versão do protocolo CSMA com prevenção de colisões. Este protocolo é bastante explorado em redes sem fio sendo empregados em protocolos importantes para tais redes, como o protocolo IEEE 802.11 [19] e IEEE 802.15.1 [23].

O protocolo CSMA/CA possui dois modos de operação. O modo mais simplificado pode ser observado na Figura 2.7. Neste modo, antes de realizar uma transmissão o nó deve verificar se o canal esta em uso. Caso o canal esteja ocioso o nó transmite o dado, representado na Figura 2.7 pela transmissão de um quadro de dados, do inglês data frame (frame). Caso o canal esteja ocupado, o nó entra em estado de backoff no qual um contador é configurado com um número inteiro escolhido de forma aleatória de modo que este número é decrementado sempre que o nó identifica que o meio esta desocupado. Quando o contador tem um valor nulo o nó transmite o pacote de dados e aguarda um reconhecimento por meio de um pacote ACK. Se este pacote não é recebido o nó volta ao estado de *backoff* [23].

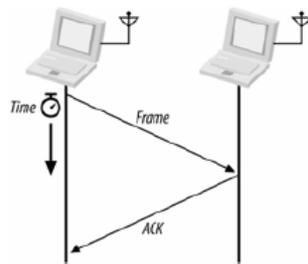


Figura 2.7: Mecanismo de comunicação do modo um do CSMA/CA [33].

Em um modo de operação alternativo a estação procura reservar o canal por meio de uma troca de pacotes de controle antes da transmissão de dados como ilustrado na Figura 2.8. Neste modo, um nó que deseja realizar uma transmissão deve sensorar o canal para identificar se o mesmo encontra-se ocupado. Somente após constatar o canal ocioso, o nó pode externar a intenção em transmitir um dado, ao seu destinatário, por meio do envio de um pacote de requisição de envio (*RTS*, do inglês *request-to-send*). Este pacote, além de anunciar o destinatário da transmissão, contém informações quanto a duração da transmissão. Deste modo, outros nós que escutam o pacote RTS entram em estado de espera ao ajustar o vetor de alocação (*NAV*, do inglês *network allocation vector*), como representado na Figura 2.9, o qual indica a ocupação do canal.

Caso o nó destinatário esteja disponível para a recepção dos dados, o RTS é respondido

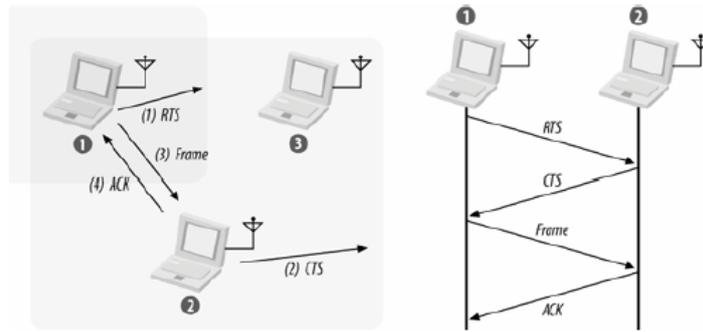


Figura 2.8: Mecanismo de comunicação do CSMA/CA [33].

através de um pacote de liberação de envio (*CTS*, do inglês *Clear-to-send*), como ilustrado nas Figuras 2.8 e 2.9. O CTS tem função análoga ao RTS, manifestando aos nós vizinhos do destinatário o tempo de transmissão para que estes possam, por sua vez, adequar a tabela NAV, como demonstra a Figura 2.9. Evitando, assim, que nós interfiram na recepção dos dados ao tentar obter acesso ao meio.

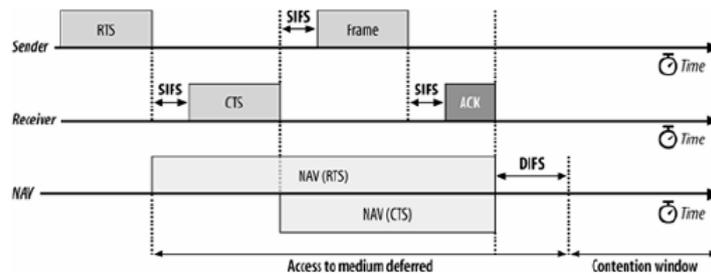


Figura 2.9: Mecanismo de comunicação do CSMA/CA [33].

A troca dos pacotes de controle objetiva, principalmente, mitigar o problema do terminal escondido abordado na Seção 2.4.1. No CSMA/CA os nós que escutam os pacotes de RTS e/ou CTS entram em estado de espera ao ajustar o NAV, como demonstrado na Figura 2.9, o qual indica a ocupação do canal evitando a interferência durante a transmissão de pacotes.

Capítulo 3

Fundamentos em *Full-Duplex*

Trabalhos sobre comunicação *full duplex* podem ser observados desde meados da década de 1970 [34, 35], estes porém, se referiam a comunicação telefônica que até então era completamente cabeada. Assim sendo, em [34], Lynch define uma linha de transmissão *full-duplex* como uma linha capaz de transmitir em ambas as direções simultaneamente. A comunicação sem fio *full-duplex* pode ser definida como uma comunicação simultaneamente bidirecional em uma mesma faixa de frequência [36]. Em resumo, um rádio *full-duplex* é um sistema capaz de transmitir e receber dados ao mesmo tempo em uma determinada banda de frequência.

3.1 Rádios *Full-Duplex*

Adicionalmente às dificuldades defrontadas pelos dispositivos sem fio, como os mencionados no capítulo anterior, os rádios *full-duplex* precisam enfrentar ainda a questão da autointerferência. Este efeito se refere à interferência proveniente do sinal transmitido o qual impacta no sinal esperado durante a recepção da informação. Embora realizar a simples subtração do sinal transmitido no sinal obtido durante a recepção aparente ser uma boa solução para o problema, à medida que os efeitos provocados pelo meio alteram a forma de ambos os sinais, soluções mais sofisticadas são requeridas.

Para efeito de se obter uma transmissão e recepção simultânea, em uma mesma frequência, um rádio Wi-Fi o qual transmite a uma potência de 20 a 23dBm (100 a 200mW) [37] precisa ser capaz de eliminar no mínimo 120dBm de sinal autointerferente, de modo a alcançar os -100dBm de ruído máximo permitido [38, 39], do inglês *floor noise*, de forma a realizar adequadamente a recepção do sinal almejado.

É importante notar que em redes com um maior distanciamento entre seus dispositivos, a transmissão precisa de uma potência mais elevada de modo a superar os efeitos do desvanecimento do sinal, como abordado na seção 2.1.3, e, portanto, requerem maiores supressões do sinal interferente. Entretanto, em redes de baixo consumo energético e que utilizam sinais de bandas estreitas, como o IEEE 802.15.4, uma supressão de 85 dBm é suficiente [9].

Bharadia *et al.* [9] faz um apanhado dos requisitos para a concepção de um rádio *full-duplex*, destacando-se:

- Visto que para femtocélulas a qual tem um alcance de no máximo 50m a potência de transmissão é de 20dBm enquanto o ruído máximo permitido é na ordem de $-90dBm$. Um rádio *full-duplex* para redes Wi-Fi deve fornecer 110dB de cancelamento linear [9]. Alguns trabalhos indicam, ainda, que este cancelamento de autointerferência deve ser entre 79 a 116dB [40].
- Um sistema *full-duplex* deve ser capaz de eliminar no mínimo 50dB do ruído analógico de forma que a interferência do transmissor fique abaixo do ruído de piso [9].
- Devido a possibilidade de saturação no circuito receptor é necessário que o circuito de cancelamento analógico garanta uma entrada menor que $-30dBm$ no conversor analógico-digital. Desta forma o cancelamento analógico deve ter um desempenho mínimo de 60dB a fim de evitar efeitos de saturação no circuito receptor [9].
- Como resultado dos requisitos anteriores, um sistema de rádio *full-duplex* deve ser capaz, também, de cancelar 50 a 60dB no domínio digital de forma a alcançar o limite de ruído permitido pelos dispositivos de rádios atuais.

Os requisitos mencionados anteriormente por Bharadia *et al.* apresentam-se de forma resumida na Figura 3.1.

Com o propósito de cumprir os requisitos listados anteriormente, a Figura 3.2 apresenta dois métodos presentes na literatura para separar os sinais de transmissão e recepção em comunicação *full-duplex*. O método de antenas-separadas, observada na Figura 3.2a, é bastante popular e tem como base a separação física dos componentes da antena [41]. Esta estratégia toma proveito da atenuação exercida pelo meio no sinal transmitido de forma a amenizar os efeitos interferentes na cadeia do circuito receptor.

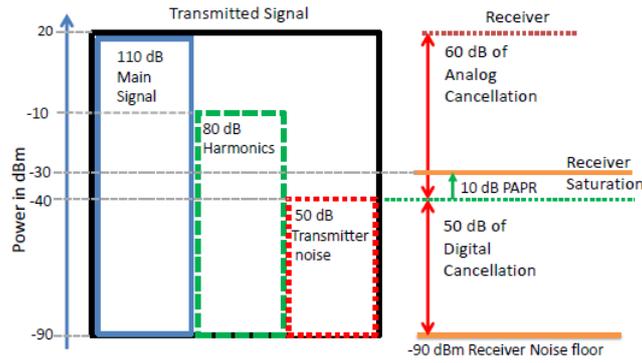


Figura 3.1: Requisitos de cancelamento de autointerferência para rádios *full-duplex* [9].

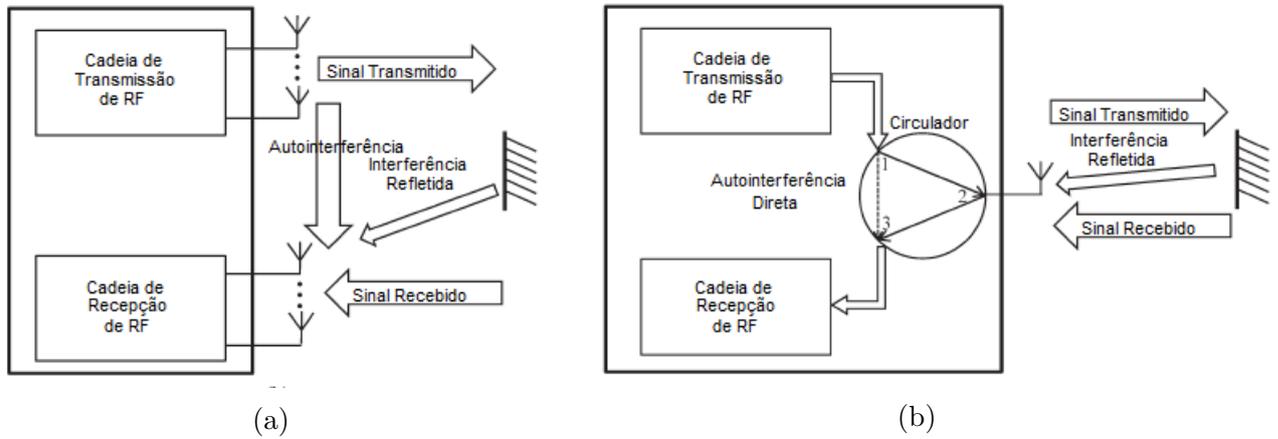


Figura 3.2: Duas configurações de antenas possíveis em terminais *full-duplex in-band* (Adaptado de [41]). (a) *Full-duplex* com Antenas-separada (b) *Full-duplex* com Antena-compartilhada.

Uma alternativa é o compartilhamento de antenas ilustrado na Figura 3.2b. Em geral a abordagem de antena-compartilhada envolve usar outros componentes, por exemplo, circuladores, representado na Figura 3.2b. Entretanto, trabalhos mais recentes demonstram alcançar melhores desempenhos ao empregar antenas de micro-fita [42]. Algumas destas estratégias serão abordadas na seção seguinte.

Em Sabharwal *et al.* [38], uma classificação das técnicas de redução de autointerferência é proposta. Como observado na Figura 3.3, nesta classificação as abordagens são divididas em três classes quanto ao domínio de atuação: domínio propagação (*propagation domain*), domínio analógico (*analog-circuit domain*) e domínio digital (*digital domain*). Uma outra distinção importante também considerada por Sabharwal *et al.* e comumente encontrada no estado-da-arte se refere ao tipo de procedimento realizado durante o processo de mitigação do sinal interferente podendo ser exercido de forma passiva, como os métodos de isolamento e supressão, ou ativa, como cancelamento analógico e digital.

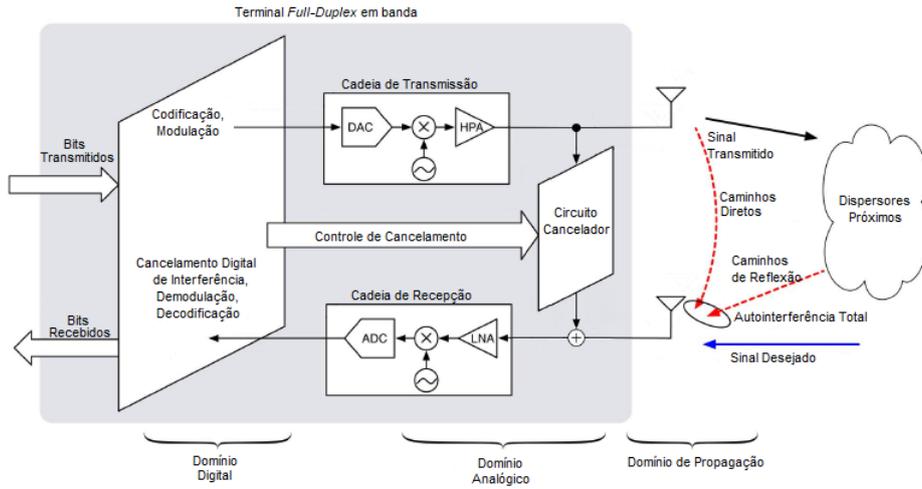


Figura 3.3: Terminal *Full-Duplex* em banda (Adaptado de [38]).

De acordo com Debaillie *et al.* os maiores desafios em rádios *full-duplex* estão em técnicas eficientes de isolamento e cancelamento de sinais, sendo definidos como:

- **Isolamento** - Consiste em procurar evitar a propagação do sinal proveniente do circuito transmissor para o circuito receptor.
- **Cancelamento** - Consistem em subtrair do sinal obtido no circuito receptor o sinal transmitido através de uma copia modificadas do mesmo.

Nas subseções seguintes um breve apanhado das técnicas de redução de autointerferência será apresentado. Uma discussão mais elaborada relativo a tais abordagens podem ser encontradas nos trabalhos de Sabharwal *et al.* [38] e Kim *et al.* [41].

3.1.1 Isolamento ou Cancelamento Passivo

Métodos de cancelamentos de autointerferência passivos ou, como proposto por Sabhawal *et al.*, supressão de autointerferência no domínio da propagação ou também isolamento são técnicas que almejam isolar eletromagneticamente a cadeia de circuito transmissor da cadeia de circuito receptor de forma a suprimir os efeitos da autointerferência antes que os mesmos se manifestem na recepção do sinal [38].

A técnica empregada por Choi *et al.* [39], um dos precursores em tecnologia de rádios *full-duplex*, é denominada Cancelamento de Antenas. Esta estratégia consiste em empregar três antenas das quais duas são utilizadas na transmissão do sinal e uma na recepção do sinal desejado. Neste procedimento as antenas transmissoras são posicionadas a uma distância d e

$d + \lambda/2$ da antena receptora como representado na Figura 3.4. Esta configuração resulta em uma interferência destrutiva na posição da antena receptora de modo a reduzir $23dB$ do sinal autointerferente.

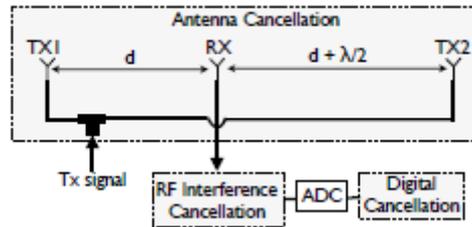


Figura 3.4: Técnica de cancelamento de antenas [43].

O afastamento de antenas é provavelmente o mecanismo de cancelamento passivo mais intuitivo, consiste em servir-se da atenuação do meio [41]. Empregado em sistemas com antenas separadas, esta tática resume-se em utilizar de um afastamento da ordem de 20 a 40cm entre as antenas transmissoras e receptoras. Desta forma toma-se proveito das perdas de propagação devido ao meio para atenuar os efeitos da autointerferência [44]. Esta técnica empregada em [36, 44] permitiu alcançar um valor médio entre $39dB$ a $45dB$ de cancelamento de autointerferência. Apesar de atrativa pela simplicidade e desempenho, essa técnica está bastante limitada ao tamanho dos dispositivos utilizados para a comunicação, visto que, seu efeito é proporcional ao espaçamento aplicado [38].

Alguns trabalhos recentes, como em Bharadia *et al.* [9], um circulador (do inglês, *circulator*) é empregado a fim de isolar o sinal transmitido do sinal desejado em um projeto com antena compartilhada. O circulador é um dispositivo, normalmente fabricado de ferrita, que constitui de 3 portas como observado na Figura 3.2b. Este componente permite a passagem de potência somente entre portas consecutivas em um único sentido (sentido horário ou anti-horário) [11], ou seja, a passagem de potência se dá somente da porta 1 a 2, da 2 a 3 e da 3 a 1 no caso do sentido. Em vista disso, Bharadia *et al.* faz uso deste dispositivo conectando o circuito de transmissão na porta 1, a antena na porta 2 e o circuito de recepção na porta 3 suprimindo então a passagem da autointerferência direta entre ambos os circuitos. Apesar de animadora, com esta técnica foi possível obter uma redução de apenas $15dB$.

3.1.2 Cancelamento Ativo

Cancelamento Analógico

Técnicas de cancelamento no domínio analógico ou, simplesmente, cancelamento analógico, são procedimentos que objetivam suprimir a autointerferência na cadeia do circuito analógico, antes do conversor analógico digital (ADC, do inglês *Analog-to-Digital Conversion*). Esse cancelamento pode ocorrer antes ou depois do Amplificador de Baixo Ruído (LNA, do inglês *Low-Noise Amplifier*) [38].

O sistema de cancelamento analógico mais simples foi proposto por Radunovic *et al.* [6] e posteriormente foi adotado no trabalho de Choi *et al.* [39]. Esta técnica trata-se de realizar uma cópia do sinal após o Amplificador de Alta Potência (HPA, do inglês *High-Power Amplifier*), como demonstrado na Figura 3.3, esta cópia tem a função de servir como um sinal de referência de modo a subtrair do sinal obtido no início do circuito receptor.

Um método semelhante ao de Choi *et al.* é aplicar o sinal de referência a uma série de linhas de transmissões paralelas com o propósito de se obter atrasos variáveis e atenuações ajustáveis [9, 45, 42, 46]. Uma alternativa a esta estratégia é adotada por Jain *et al.* [43] e compreende em aplicar um método conhecido como *Balun*. Esta técnica inclui o balanceamento e desbalanceamento da cópia do sinal a ser transmitido para, então, serem aplicados os ajustes de atrasos e atenuações no sinal e, por fim, realizar o cancelamento da autointerferência no domínio analógico.

Uma outra abordagem envolve processar uma cópia do sinal no domínio digital de modo a aplicar adaptações necessárias digitalmente como ajustes de ganho, fase e atrasos e em seguida realizar uma conversão digital-analógica para efetuar o cancelamento do sinal analógico no circuito receptor [36, 44, 47]. Esta técnica detém a vantagem de ser mais simples visto que realizar operações de atenuação e atrasos em sinais no domínio digital é menos complicado que realizá-lo no domínio analógico [41].

Cancelamento Digital

Procedimentos de cancelamento no domínio digital ou, meramente, cancelamento digital têm a finalidade de cancelar a autointerferência após o conversor analógico-digital. Este processo é empreendido ao se aplicar técnicas avançadas de Processamento Digital de Sinais (PDS) tornando sistemas de processamentos sofisticados relativamente mais fáceis [38].

Em tecnologias *full-duplex* as técnicas de cancelamento digital são as últimas barreiras a serem empregadas, pelos sistemas, na mitigação da autointerferência e por este motivo estes procedimentos devem ser capazes de eliminar a interferência remanescente deixada pelos processos de isolamento e cancelamento analógico. As técnicas de cancelamento digital, entretanto, não são novidades na literatura de comunicações sem fio, sendo estes empregados com o propósito de eliminar interferências em sinais, como desempenhado nas estratégias de *successive interference cancellation* (SIC) [48], *analog network coding* (ANC) [49] e decodificação ZigZag [50] na tentativa de recuperar pacotes em situações de colisões entre sinais.

Choi *et al.* ressalta que estas técnicas podem ser empregadas em rádios *full-duplex*, porém, uma vez que os símbolos dos sinais interferentes são conhecidos, visto que se trata do sinal transmitido pelo próprio rádio, a decodificação do sinal seria desnecessária facilitando o processo de recuperação dos sinais. Entretanto, a previsão de atrasos e mudanças de fases se apresentam como um grande desafio em projetos de rádios *full-duplex* e por este motivo são escopo de vários trabalhos no estado-da-arte.

Kim *et al.* [41] indica alguns trabalhos que empregam esquemas como Erro Quadrático Máximo [51] e estratégias com múltiplas antenas, como *zero-forcing beamforming* (ZF), projeção espacial nula (NSP, do inglês *null space projection*) e filtros de erro médio quadrático são alguns métodos adotados por [52] e [53].

3.2 Redes *Full-Duplex*

Da perspectiva das camadas de rede e de controle de acesso ao meio, a comunicação *full-duplex* traz não somente novas possibilidades, mas também grandes benefícios. Kim *et al.* [41] e Thilina *et al.* [54] listam alguns desses benefícios:

- **Aumento da Capacidade de Transmissão:** Ao permitir a presença de duas transmissões em andamento em uma mesma vizinhança, seja esta realizada entre dois ou três nós, a comunicação *full-duplex* proporciona, intuitivamente, o aumento significativo da capacidade de transmissão da rede [55, 56, 57].
- **Detecção de Colisão:** As tecnologias *full-duplex* permitem que os dispositivos sensores o canal de modo a identificar a ocorrência de outras transmissões e, conseqüentemente, a identificação de forma rápida a eventualidade de colisões em seus pacotes de dados. Além disso, esta técnica possibilita que nós em processo de recepção de dados

podem facilmente alertar o nó transmissor quanto ao fracasso na transferência de informações devido a uma colisão. Esta situação torna-se vantajosa quando provocada por um dispositivo situado fora do alcance de transmissão do remetente.

- **Reconhecimento Instantâneo:** Em métodos de comunicação *full-duplex* os receptores podem reconhecer a entrega de pacotes de dados instantaneamente. Deste modo, o transmissor pode atuar de maneira imediata em situações nas quais a transmissão de dados falha permitindo a rápida retransmissão de pacotes.
- **Redução de Latência:** As comunicações *full-duplex* possibilitam uma redução da latência da rede ao permitir a recepção de sinais de *feedbacks* como informações do estado do canal, requisições de repetições automáticas (ARQ, do inglês *Automatic Repeat Request* também conhecido como *Automatic Repeat Query*), ACKs e etc., durante o processo de transmissão [57].
- **Redução de Atrasos:** Os pontos abordados anteriormente somados a capacidade de efetuar retransmissões praticamente instantaneamente após o recebimento de pacotes a serem repassados colaboram para a redução significativa da latência em redes sem fio [58, 59].
- **Aumento de segurança:** O uso de comunicações *full-duplex* também representa um acréscimo de segurança na rede visto que a interferência devida a presença de duas transmissões em curso dificulta a interceptação de informações no processo conhecido como *eavesdropping* [60, 61, 62].
- **Mitigar o Problema do Terminal Escondido:** As tecnologias *full-duplex* permitem ainda novas abordagens para solucionar o problema do terminal escondido. A exemplo, troca simultânea de pacotes de dados e/ou emissão de sinais, ditos *busytone*s, por parte do receptor de forma a indicar a ocupação do canal são estratégias bastantes difundidas na literatura para mitigar este problema.
- **Transferência de Energia durante Transmissões:** Trabalhos recentes também apontam ser possível que dispositivos sem fio obtenham energia por meio das transmissões de outros equipamentos em um processo conhecido como Colheita de Energia, do inglês *Harvest Energy*. Diferente das tecnologias *half-duplex*, em *full-duplex* este processo de recarga pode ser realizado mesmo estando, o dispositivo, com uma transmissão em curso [63].

3.2.1 Topologia

Semelhantemente às abordagens multicanais, as conexões *full-duplex* permitem que os elementos da rede estabeleçam até duas conexões simultâneas. Estas conexões podem ser referenciadas na literatura como conexões-duplas, do inglês *dual-links* [64]. À medida que um nó é capaz de estabelecer até duas conexões, novas topologias surgem. As topologias mais comuns são apresentadas na Figura 3.5.

Do ponto de vista dos protocolos de controle de acesso, é importante diferenciar as duas transmissões em curso denominadas transmissões primárias e secundárias. As transmissões primárias decorrem da conexão inicial realizada por um nó o qual obteve sucesso ao adquirir a posse do canal sendo este, então, chamado de transmissor primário (PT, do inglês *primary transmitter*) e seu destinatário é dito receptor primário (PR, do inglês *primary receiver*).

Como mencionado anteriormente, em *full-duplex*, uma transmissão secundária pode ocorrer juntamente com a primária, sendo a secundária, de forma análoga à primária, desempenhada pelos nós transmissor secundário (ST, do inglês *secondary transmitter*) e receptor secundário (SR, do inglês *secondary receiver*). As transmissões secundárias dão origem a duas novas topologias: a bidirecional e a retransmissão.

As transmissões bidirecionais ocorrem quando o nó receptor, ou seja, receptor primário, também dispõe de dados a serem enviados ao transmissor. Neste caso o receptor primário também atua como transmissor secundário enquanto o transmissor primário assume uma atuação análoga como demonstra a Figura 3.5a. Além do mais, em alguns casos, pode-se identificar essa topologia quando reconhecimento de pacotes de forma “instantânea” é almejado. Uma vez que conexões bidirecionais são facilmente identificadas, além de ser simples de serem gerenciadas, estas configurações são mais usuais em protocolos MAC *full-duplex*.

As retransmissões, ou transmissões em três nós, geralmente decorrem da impossibilidade de se compor uma conexão bidirecional. Duarte *et al.* [65] aponta que estas configurações podem assumir duas variações baseada no destinatário ou na fonte. As retransmissões baseadas no destinatário ocorrem quando o nó receptor não contém dados para seu destinatário, mas o tem para um terceiro nó, como apresentado na Figura 3.5b. Neste cenário o receptor primário pode iniciar a transmissão para um de seus vizinhos. Ao iniciar uma nova transmissão, o PR tornar-se, também, ST enquanto seu receptor torna-se SR da topologia *Full-duplex*. Por outro lado, como ilustrado na Figura 3.5c, um nó atento às transmissões do PT é capaz de transmitir dados para o transmissor primário caso observe que este nó não atua também como receptor,

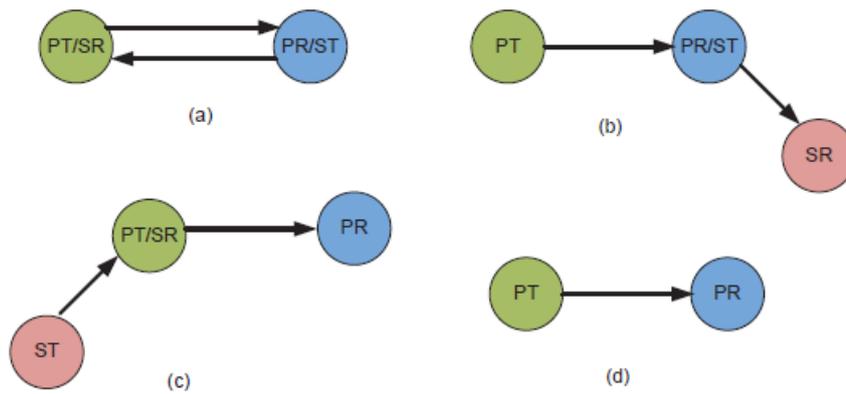


Figura 3.5: Diferentes topologias em redes *full-duplex*: (a) Comunicação *full-duplex* bidirecional, (b) Comunicação *full-duplex* unidirecional baseada no destino, (c) Comunicação *full-duplex* unidirecional baseada na fonte, (d) Comunicação *half-duplex*. [65].

sendo este cenário conhecido como retransmissão baseada na fonte.

Apesar das várias possibilidades apresentadas em comunicações *full-duplex*, em alguns casos nenhuma das opções anteriores é possível, seja pelo fato de um dos rádios se comunicar somente em *half-duplex* ou pelo fato do receptor secundário não ter dados para nenhum de seus vizinhos, como também não existe nós que almeje se comunicar com o transmissor primário. Nestes casos, a comunicação *half-duplex* se demonstra uma solução satisfatória em alguns protocolos, conforme ilustrado na Figura 3.5d.

Capítulo 4

Classificação dos Protocolos MAC

Full-Duplex

Um grande número de protocolos *full-duplex* foram propostos a partir da formulação do protocolo *ContraFlow* em 2009 [6]. Em uma classificação apresentada por [41] algumas características importantes ao analisar os protocolos de controle de acesso *full-duplex* em banda são apontadas. Estas características se referem a arquitetura de rede alvo para o qual o protocolo foi projetado, a simetria do tráfego de dados e a tolerância à interferência entre os nós *full-duplex* em certos níveis.

A primeira característica deve ser observada para o proveito máximo da tecnologia *full-duplex*. Como abordado na Seção 2.2 as arquiteturas das redes sem fio centralizadas e distribuídas são muitas vezes díspares e por conseguinte demonstram conveniências e limitações distintas, sobretudo no que concerne a maneira em que os nós obtém acesso ao meio. Em vista disto, as redes sem fio requerem abordagens diferentes ao proporcionar uma comunicação *full-duplex*.

A segunda característica está relacionada a quantidade de tráfego entre os nós. Como explicado nos capítulos anteriores, uma das motivações em se empregar uma tecnologia *full-duplex* trata-se da viabilidade em se solucionar o problema do terminal escondido. Este problema pode ser prontamente resolvido quando dois terminais dispõe de dados simétricos entre si. Todavia, os dados entre os dispositivos comunicantes são, geralmente, assimétricos ou, até mesmo, inexistente o que se traduz em uma maior complexidade tanto na exploração dos recursos *full-duplex* quanto na solução dos problemas clássicos das redes sem fio.

A terceira característica foi elucidada a priori por Kim *et al.* [66] e concerne a questão de

que ao se permitir níveis relativamente baixos de interferência entre os dispositivos é possível não só ampliar a gama de possibilidades de comunicação como a vazão total da rede [67].

4.1 Protocolos para Redes Infra-estruturadas

Jain et al. (2010) - O primeiro, dos três protocolos, conhecidos na literatura como FD-MAC (*Full-Duplex* MAC) [43] é geralmente referenciado, deste modo, em virtude de ser o primeiro protocolo de acesso ao meio destinado a comunicação *full-duplex* a ser implementado em um hardware real. Baseado na proposta de Radunovic et al. [6], e portanto de forma semelhante, os nós iniciam transmissões em CSMA/CA e em seguida uma transmissão *full-duplex* é instaurada caso a troca simultânea de dados seja possível.

Entretanto, diferente do ContraFlow [6], o protocolo proposto por Jain et al. [43] não abrange a comunicação *full-duplex* unilateral se atendo, apenas, aos cenários de comunicações bilaterais visto que estas são mais simples de serem solucionadas. Na eventualidade dos pacotes de dados serem assimétricos, ou seja, um dos nós possui mais dados que o outro, o nó que finaliza a transmissão primeiro deve emitir um sinal de *busy tone* até termino da recepção de dados de modo a proteger a comunicação dos efeitos do terminal escondido. O sinal de *busy tone* é enviado com o mesmo propósito em circunstâncias em que o receptor não possui dados para seu transmissor.

Sahai et al. (2011) - O protocolo proposto por Sahai et al. [67] é uma versão assíncrona do protocolo proposto por Jain et al. [43]. Este protocolo toma como base os elementos do protocolo IEEE 802.11 DCF e é o precursor dos protocolos *full-duplex* assíncronos por este motivo é citado em alguns trabalhos como FD-MAC, tornando-se o segundo, dos três protocolos, a ser alcunhado com este nome. Para tal, Sahai et al. acresce 45 bits aos pacotes do IEEE 802.11 destinados ao controle das transmissões FD. Como pode ser observado na Figura 4.1, Sahai et al. adiciona o DUPMODE (1 bit) para identificar o tipo de comunicação (FD ou HD), HOL(1 bit) indica se o próximo pacote tem o mesmo destino que o atual, em caso afirmativo DURNXT (2 bytes) revela a duração do próximo pacote, DURFD (2 bytes) para indicar a duração da comunicação em modo *full-duplex*, CTS (1 bit), por fim, o SRB (10 bits) para indicar duração de *backoff*.

Neste protocolo as transmissões são iniciadas em HD. Porém, se ambos nós possuem pacotes

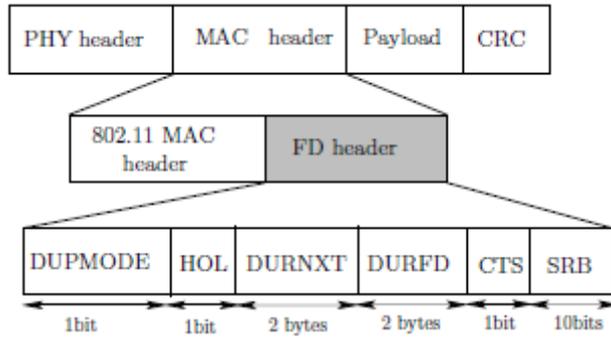


Figura 4.1: Estrutura de Pacote em Sahai *et al.* [67]

para trocar, uma comunicação síncrona em FD é iniciada na qual os pacotes de ACK são trocados após o término de transmissão de cada pacote de dados. Em caso de perda de pacote o nó que não recebeu o pacote ACK compete novamente pelo meio afim de realizar a retransmissão do pacote.

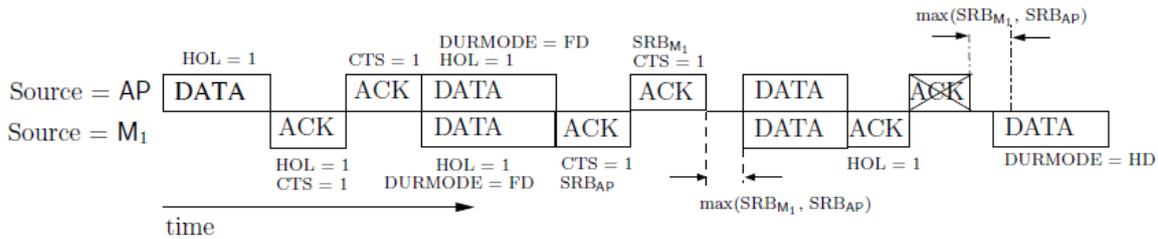


Figura 4.2: Diagrama de transmissão bidirecional do Sahai *et al.* [67]

Sahai *et al.* [67] acrescenta ainda três novos mecanismos ao protocolo IEEE 802.11 com a finalidade de proporcionar justiça e oportunidades de efetuar uma transmissão FD.

Backoff Aleatório Compartilhado - Do inglês *Shared Random Backoff*, é um mecanismo com o propósito de entregar justiça aos nós da rede. No caso em que o ponto de acesso e um nó possuem vários pacotes para serem trocados entre si em modo *full-duplex* é necessário dar a oportunidade de outros nós disputarem o canal. Para isto, ambos concordam em abortar a comunicação *full-duplex* por um tempo aleatório e em caso de nenhum outro nó obter o acesso ao meio ambos retomam a comunicação em *full-duplex*.

Investigar Oportunidade de Modos FD - Do inglês *snooping to leverage FD mode*, é uma estratégia de descoberta da topologia da rede na qual os nós sobre-escutam os pacotes transmitidos de modo a identificar se estão no mesmo raio de transmissão ou se representam um terminal escondido para algum nó da rede.

A informação oriunda deste procedimento permite a formação de transmissões de três nós

baseada na fonte nos casos em que o nó que almeje tornar-se transmissor secundário satisfaça as seguintes condições: (i) o ponto de acesso é transmissor primário, mas não é receptor secundário e (ii) o nó em questão seja terminal escondido para o receptor primário. Esta situação pode ser observada na Figura 4.3 em que o nó M_2 sobre-esculta os pacotes transmitidos pelo ponto de acesso, mas não esculta o pacote ACK enviado pelo nó M_1 satisfazendo desse modo a condição (ii). A condição (i) é satisfeita em seguida ao notar que a estação base continua a transmitir em *half-duplex* (HOL=1) possibilitando M_2 a transmitir logo após.

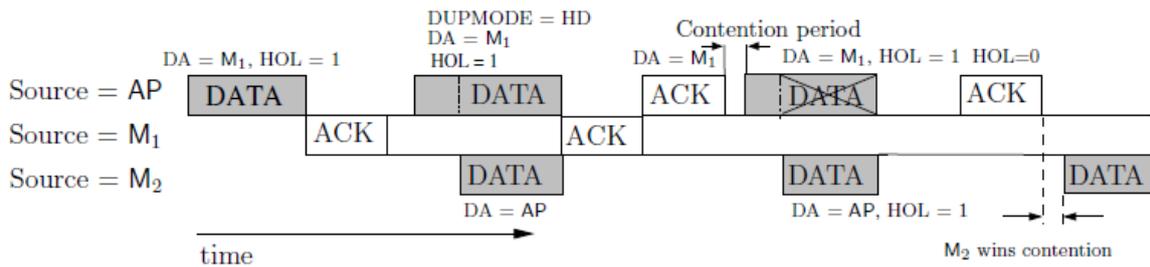


Figura 4.3: Diagrama de transmissão unidirecional do Sahai *et al.* [67]

Resolução Virtual de Disputa - Do inglês *virtual contention resolution* engloba dois mecanismos. No primeiro o objetivo é impedir que os demais nós da rede sejam prejudicados devido a comunicação excessiva do ponto de acesso em *full-duplex* com um único nó. Deste modo, inicialmente para descobrir oportunidade de comunicação *full-duplex* o ponto de acesso realiza uma busca em seu *buffer* por um pacote para um dado nó. Porém, após a primeira troca de dados o ponto de acesso passa a explorar a possibilidade de continuar a transmissão em FD com uma probabilidade de decaimento geométrico. O segundo visa evitar conflitos entre nós que detectam a possibilidade de uma comunicação *full-duplex*. Para isto cada nó que descobre esta conveniência apenas a explora com uma probabilidade $p = \frac{\beta}{CW_{max}}$, onde CW_{max} é o valor máximo da janela de contenção e β controla a agressividade do método.

AC-MAC (2012) - O protocolo AC-MAC [68] busca agregar as oportunidades das operações *full-duplex* empregando controle de janela de contenção. Neste protocolo antes de obter acesso ao meio os nós da rede devem entrar em um período de *backoff* de duração aleatória entre zero e o valor mínimo da janela de contenção.

No AC-MAC, os receptores primários verificam a existência de dados para o transmissor e em caso afirmativo o transmitem em comunicação *full-duplex*. Entretanto, em caso negativo o protocolo estipula que a comunicação deve prosseguir em modo *half-duplex*. Consequentemente,

este protocolo não explora as comunicações *full-duplex* unilaterais e muito menos se beneficiam da capacidade da tecnologia de se proteger dos efeitos do terminal escondido.

AC-MAC/DCW (2012) - Este protocolo [68] é uma variação do AC-MAC proposto pelo mesmo autor. Nesta versão o ponto de acesso tem duas janelas de contenção definidas: uma pequena (CW_{small}) e uma grande (CW_{large}), além de empregar um limiar na fila de transmissão da estação base. Diferente do AC-MAC, após completar uma transmissão o ponto de acesso verifica o comprimento de sua fila de transmissão para decidir qual janela de contenção será empregada.

Caso a fila de transmissão tenha um comprimento inferior ao limiar, a CW_{large} é adotada a fim de prover aos clientes maiores possibilidades de transmissão. Na eventualidade desta fila exceder o limiar, a janela de contenção CW_{small} é usada de forma a beneficiar o ponto de acesso. Esta adaptação tem o objetivo de eliminar a desvantagem encontrada no AC-MAC que tem o desempenho limitado em cenários onde as transmissões originadas nos clientes com destino ao ponto de acesso são mais frequentes que a direção contrária. Nestas configurações a estação base quase não possui dados a serem trocados com seus clientes o que implica em uma redução da vazão [68].

Janus (2013) - O protocolo Janus [66] foi desenvolvido com o propósito de possibilitar a comunicação entre os nós da rede e o ponto de acesso mesmo que as transmissões primárias e secundárias interfiram entre si em certos graus. A fim de alcançar este objetivo o Janus segmenta um ciclo em três períodos por ciclo: Período de Preparo de Agendamento, Período de Troca de Pacotes e Período de Reconhecimento, conforme indicado na Figura 4.4.

No Período de Preparo de Agendamento o ponto de acesso sonda a rede para obter informações referentes a transmissões do ciclo. Neste período os nós que desejam transmitir devem anunciar esta intenção de forma ordenada por meio de uma *flag*. Os nós que pretendem transmitir recebem um pacote de Requisição de Informação que informa a ordem em que os nós devem responder com pacotes de Resposta de Requisição de Informação contendo as informações relativas ao tamanho da transmissão e ao grau de interferência sentida pelos nós vizinhos. O período é finalizado com a transmissão em *broadcast* do agendamento das transmissões.

O ciclo é finalizado com a emissão de todos os pacotes os quais o ponto de acesso requer

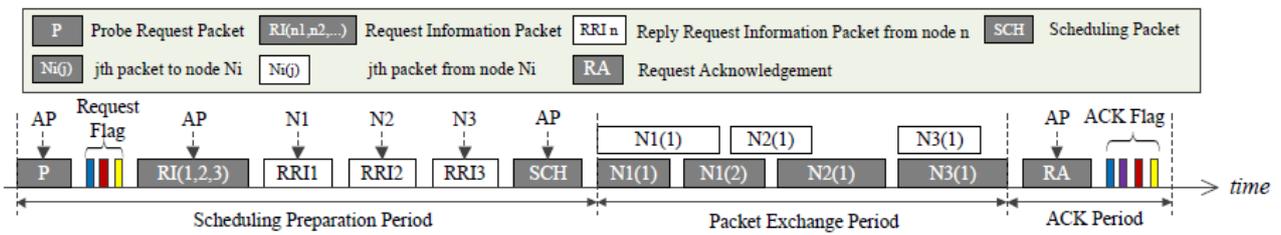


Figura 4.4: Esquemático de troca de pacotes do protocolo Janus [66].

reconhecimento, sendo este novamente respondido de forma ordenada a fim de evitar conflito entre tais pacotes de controle. Apesar da vantagem de permitir a troca de pacotes a níveis aceitáveis de interferência entre nós, o Janus apresenta a desvantagem de sobre-escuta e sobrecarga. Adicionalmente, não é baseado em nenhum protocolo de comunicação existente o que dificulta a adaptação de dispositivos ao protocolo.

Duarte *et al.* (2014) - Em seu trabalho Duarte *et al.* [47] não só projeta um sistema *full-duplex* de multi-antenas, como propõe um novo protocolo para redes com infraestrutura que permite integrar os dois modos de comunicação na rede. O protocolo proposto por Duarte *et al.* [47] advém de modificações realizadas no protocolo IEEE 802.11 DCF para permitir a comunicação tanto em modo *full-duplex* quanto em modo *half-duplex*.

A primeira adaptação ocorre quando um nó *full-duplex* recebe um pacote RTS endereçado para si. Neste momento o receptor primário realiza uma busca em sua fila de pacotes e seleciona o primeiro pacote endereçado ao transmissor primário. Em caso de êxito, o receptor primário responde com um pacote CTS seguido de um período de inatividade (SIFS) e logo após inicia a transmissão dos dados.

Um outro ajuste é efetuado durante a transmissão de pacotes ACK. Em protocolos *half-duplex* a troca destes pacotes é executada ao fim da recepção de cada pacote de dados. Porém, em modo *full-duplex* se a transmissão de dados for assimétrica o nó com menor pacote de dados deve aguardar um tempo maior para receber a confirmação de entrega dos dados, pois o outro nó ainda está em processo de transmissão dos dados.

O último ajuste tem a finalidade de prover justiça aos nós da rede. Durante a comunicação *full-duplex* todos os nós que não participam da transmissão devem obter pacotes errôneos devido a colisão dos dados proveniente dos transmissores e deste modo aguardam um período longo (EIFS) para permitir que possíveis nós que tenham recebido o dado corretamente respondam com ACK. Entretanto, os nós ativos tem os pacotes decodificados corretamente e por isso ao

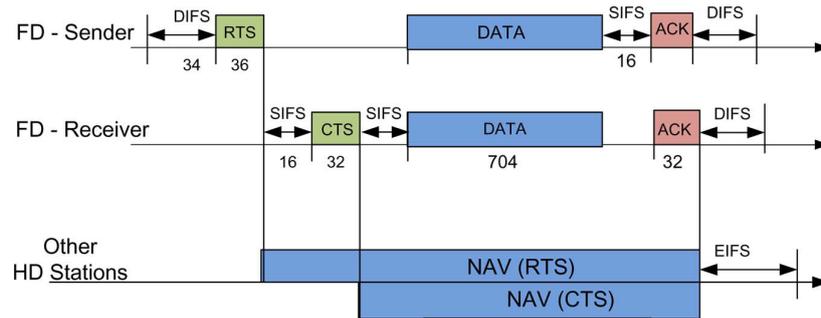


Figura 4.5: Esquemático de troca de pacotes em modo *full-duplex* do protocolo proposto por Duarte *et al.* [47].

fim da troca de dados ficam ociosos por um tempo mais curto (DIFS).

Conseqüentemente, os transmissores primários e secundários teriam maiores chances de obter o acesso ao meio novamente, como pode ser observado na Figura 4.5, situação esta que resultaria em uma disputa injusta pelo canal. Com a intenção de solucionar este problema, Duarte *et al.* [47] propõe que os nós ativos renunciem a contenção por um período de EIFS do mesmo modo que os nós vizinhos.

É importante notar que o fato das modificações no protocolo IEEE 802.11 serem realizadas de formas pontuais permite ao protocolo suportar ambas as comunicações (*half* e *full-duplex*). Entretanto, a proposta de Duarte *et al.* impede a exploração das comunicações *full-duplex* unilaterais.

Tang & Wang (2014) - Protocolo destinado a redes com infraestrutura baseado no IEEE 802.11 DCF. O protocolo de Tang e Wang [69] assume que apenas o ponto de acesso é provido de comunicação *full-duplex* e todos os outros dispositivos móveis da rede funcionam exclusivamente em modo *half-duplex*. Diferente do ContraFlow [64], este protocolo explora o efeito de captura [70, 71] para permitir a comunicação entre os nós e o ponto de acesso mesmo que os nós não sejam terminais escondidos entre si. Este mecanismo permite a decodificação do sinal mais forte mesmo após uma colisão de pacotes. Além do mais, se o preâmbulo do primeiro pacote não colide, então é relativamente mais fácil de decodificar este pacote. Logo, o protocolo se baseia em duas condições. A primeira é que o ponto de acesso precisa transmitir com potência mais elevada que o transmissor primário e a segunda é que o PA deve iniciar a transferência de dados antes do transmissor primário para que o efeito de captura seja bem sucedido.

A fim de que o ponto de acesso realize a melhor escolha do receptor secundário, é fundamental que este tenha conhecimento da topologia da rede e conceba um mapa denominado mapa

de razão sinal-transferência, do inglês *signal-interference ratio*. Com essas informações, sempre que o ponto de acesso recebe um pacote RTS ele responde com CTS e imediatamente seleciona um nó como receptor secundário e inicializa a transmissão secundária logo após a transmissão do CTS. Ao receber o CTS o nó transmissor primário identifica uma comunicação *full-duplex* em curso com o ponto de acesso ao notar que o tamanho da transferência indicada no pacote CTS é maior que a requisitada no pacote RTS enviado. O transmissor primário, então, atrasa sua transferência, como observado na Figura 4.6, de modo a permitir que o preâmbulo do ponto de acesso chegue ao destinatário sem colisão.

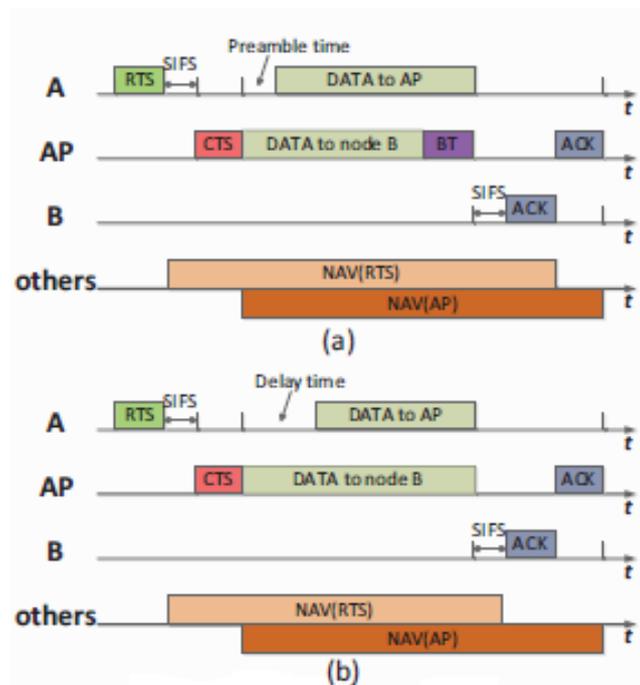


Figura 4.6: Esquemático de troca de pacotes em modo *full-duplex* do protocolo proposto por Tang e Wang [69].

Pode ser notado na Figura 4.6a que caso o ponto de acesso termine a transferência de seus dados antes que o transmissor primário, um *busy tone* é enviado com a finalidade de proteger o PA do problema do terminal escondido. Nos cenários em que o ponto de acesso não possui dados endereçados a nenhum outro nó a transmissão continua normalmente em modo *half-duplex*. A comunicação *half-duplex* também ocorre se a estação base obtiver acesso ao meio via RTS. Consequentemente, este protocolo não explora as possibilidades de comunicações *full-duplex* bilaterais e unilaterais baseada na fonte.

PoCMAC (2015) - O protocolo PoCMAC [72] de *Power Control MAC* aplica o conceito de nível ótimo de potência de transmissões com o intuito de evitar a interferência entre os nós

durante uma transmissão unilateral com o ponto de acesso. Assim como em [69], o único nó da rede dotado de um rádio *full-duplex* é o ponto de acesso. O PoCMAC também diferencia os cabeçalhos dos nós clientes por HC, do inglês *header of the client* e do ponto de acesso HA, do inglês *header of the access point* além dos pacotes de controle: CTS-U (clear-to-send-upstream), CTS-D (clear-to-send-downstream) e de forma análoga ACK-U e ACK-D.

PoCMAC emprega um mecanismo semelhante ao do protocolo IEEE 802.11. O acesso ao meio é feito pela transmissão bem-sucedida de um pacote RTS. Ao receber um pacote RTS, o ponto de acesso deve respondê-lo com um pacote CTS-U o qual, não somente consente com a transmissão de dados, como também indica o nó de destino da transmissão realizada em modo *full-duplex* pela estação base. Os pacotes CTS-D, por sua vez, são utilizados pelo nó escolhido como receptores secundários para reconhecer a recepção de pacotes de modo similar à transmissão dos pacotes CTS no IEEE 802.11.

As variações concebidas pelo PoCMAC são principalmente no início das comunicações. Ao verificar um RTS, o ponto de acesso computa as interferências entre seus clientes, bem como a potência de transmissão utilizada pelo transmissor primário. Esta abordagem tem o propósito de minimizar a interferência entre clientes enquanto a potência de transmissão é maximizada obtendo maiores probabilidades de sucesso nas transmissões secundárias. Em seguida, a estação indica o nó destinatário da transmissão secundária por meio de um CTS-U e inicia a transmissão de dados. Já o nível da potência a ser empregado na comunicação primária é apontado no cabeçalho destes pacotes de dados.

Ao término das transmissões, o receptor secundário notifica a recepção dos dados por meio de um ACK-D. Seguidamente, o ponto de acesso sempre transmite um ACK-U informando a seus clientes que este período de comunicação se encerrou. O reconhecimento de pacotes para o transmissor primário é feito por meio de um bit no pacote ACK-U.

4.2 Protocolos para Redes *Ad Hoc*

ContraFlow (2009/2011) - O ContraFlow é um dos primeiros protocolos MAC dedicados a tecnologia *full-duplex* sendo sua primeira proposta datada de 2009 nos trabalhos de Radunovic *et al.* [6] e posteriormente apresentada em Singh *et al.* [64]. No ContraFlow os nós obtêm acesso ao meio através do protocolo CSMA/CA. Ao identificar que o pacote é endereçado a si, o receptor primário deve decidir entre transmitir um sinal *busy tone* de modo a proteger a

transmissão ou iniciar uma transmissão secundária como apresentado na Figura 4.7.

A escolha do receptor secundário, por sua vez, é realizada de acordo com uma lista ponderada a qual é baseada na taxa de sucessos das transmissões secundárias de todos os possíveis receptores secundários. Esta adaptação tem o propósito de mitigar colisões de pacotes em transmissão secundárias causadas, principalmente, pela transmissão realizada pelo transmissor primário e por transmissões habituais nas regiões circunvizinhas ao receptor secundário.

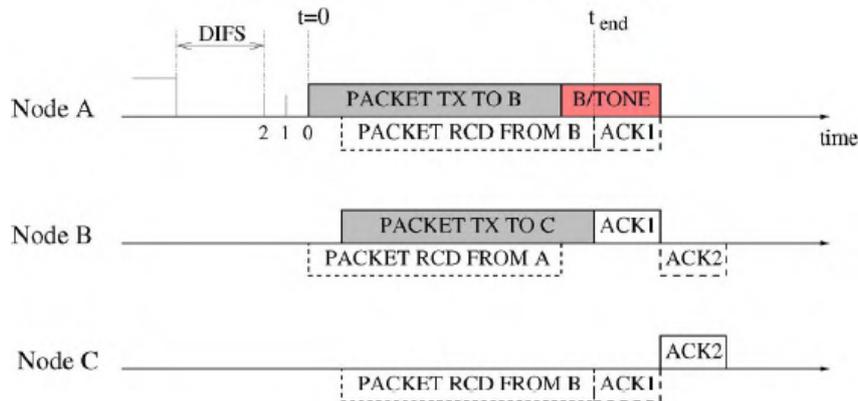


Figura 4.7: Comunicação *full-duplex* do protocolo ContraFlow [64].

Ao fim da comunicação o transmissor primário emite um sinal de *busy tone* de modo a indicar que o meio permanece ocupado enquanto aguarda o reconhecimento dos pacotes pelo seu receptor. De forma análoga, o receptor primário preserva o canal dos efeitos do terminal escondido emitindo *busy tone* até que a transmissão primária se encerre, como observado na Figura 4.8. Em seguida, o receptor primário envia o pacote ACK ao passo que o receptor secundário aguarda sensorar o meio ocioso para enviar seu reconhecimento de dados.

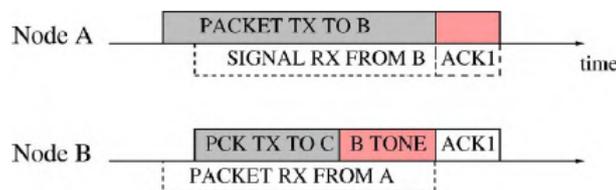


Figura 4.8: Comunicação *full-duplex* assimétrica do protocolo ContraFlow [64].

O receptor secundário não pode resguardar o canal com *busy tone*, haja vista que esta ação interferiria na transmissão primária. O ContraFlow delimita os pacotes das transmissões secundárias a no máximo o tamanho equivalente ao pacote transmitido na transmissão primária.

Goyal et al. (2013) - Com o propósito de explorar todas as configurações possíveis em

rádios *full-duplex*, Goyal *et al.* propõe o acréscimo de dois bits de sinalização para permitir que o receptor primário indique o tipo de comunicação *full-duplex* que o nó está disposto a realizar. Esta notificação foi denominada de reconhecimento *full-duplex* (FDA, do inglês *full-duplex acknowledgment*) e pode assumir os valores presentes na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores do reconhecimento *full-duplex* [65].

Valor	Descrição
0	Receptor possui pacote a transmissor
1	Receptor possui pacote a outro nó
2	Sem transmissão em <i>full-duplex</i>
3	Transmissão não permitida

O cenário de uma transmissão bidirecional está representado na Figura 4.9 na qual se observa que após o envio do cabeçalho MAC endereçado a seu destinatário o transmissor primário emite um sinal de *busy tone* até a recepção de um FDA para indicar aos demais nós que o canal permanece ocupado. Depois da recepção do FDA indicando a possibilidade de uma comunicação *full-duplex* bidirecional, o transmissor primário sinaliza esta configuração por meio de um bit chamado de sinal de transmissão (TF, do inglês *transmission flag*) externando a impossibilidade de receber dados. Como apresentado na Figura 4.9, em quadros de assimetria de dados, o protocolo estabelece que o nó emita um sinal de *busy tone* até o fim da recepção, protegendo, assim, a comunicação. Por fim, a comunicação é encerrada com a troca de ACKs em *full-duplex*.

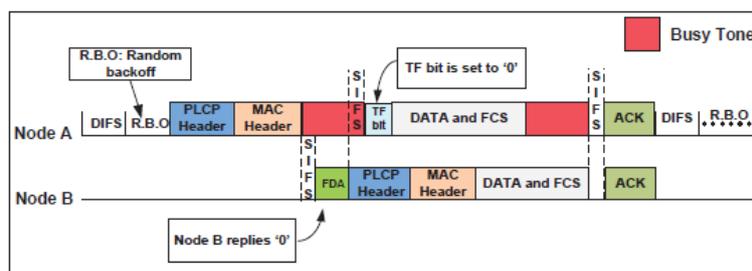


Figura 4.9: Comunicação *full-duplex* bidirecional do protocolo proposto por Goyal *et al.* [65].

As condições em que o receptor primário deseja transmitir para outro nó são mais complexas, visto que deve-se garantir que a comunicação secundária não interfira na primária. Semelhantemente a comunicação *full-duplex* bidirecional, o receptor primário indica sua ambição de transmitir ao nó C por meio do FDA, este cenário é representado na Figura 4.10 pelo nó B que em seguida envia um pacote destinado ao nó C. O receptor secundário, por sua vez, deve mensurar a interferência causada pelo transmissor primário, de modo a determinar a viabilidade

da comunicação secundária. O nó receptor secundário responde com FDA no valor 2 em caso afirmativo e 3 em caso negativo.

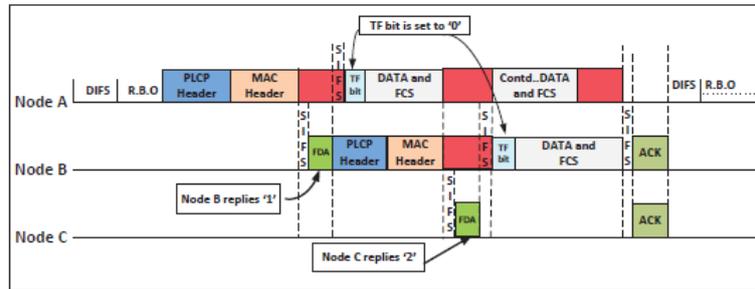


Figura 4.10: Comunicação *full-duplex* unidirecional baseada no destino do protocolo proposto por Goyal *et al.* [65].

O caso em que o receptor primário não possui dados para seu transmissor também é previsto pelo protocolo. Neste cenário o transmissor indica a possibilidade de receber dados por meio do sinal TF. Assim como no caso das comunicações unidirecionais baseadas no destinatário, os nós que desejam transmitir devem se certificar que não interferiram na comunicação primária. A candidatura a transmissor secundário é então realizada pela emissão de um *busy tone* em uma subportadora escolhida de forma aleatória, como demonstrados na Figura 4.11. Esta abordagem visa evitar a colisão de pacotes de vários nós vizinhos que desejam torna-se transmissor.

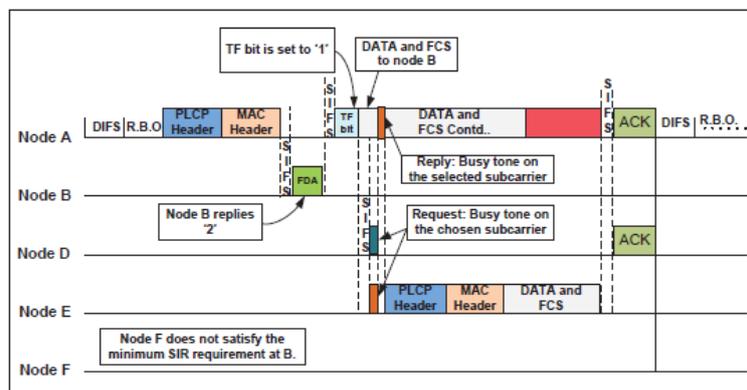


Figura 4.11: Comunicação *full-duplex* unidirecional baseada na fonte do protocolo proposto por Goyal *et al.* [65].

Ao sensorar a presença dos *busy tones* em subportadoras, o transmissor primário deve escolher uma delas de forma aleatória respondendo somente ao nó por meio de um *busy tone* na subportadora determinada.

RFD-MAC (2013) - O Relay Full-Duplex MAC [73] é um protocolo que visa otimizar as

transmissões *full-duplex* unidirecionais em redes de multi-saltos. O RFD-MAC parte da ideia de que os transmissores primários devem selecionar um dos nós vizinhos para ser transmissor secundário. No entanto, o nó selecionado deve ser o mais próximo para assegurar que os receptores serão diferentes.

Para realizar tal seleção, todos os nós da rede sobre-escutam as transmissões circunvizinhas de modo a formar uma tabela denominada tabela de nós circundantes (*surrounding node table*). Esta tabela contém: os endereços dos nós, indicações de quais nós possuem dados destinado ao nó em questão e quais são os nós que ainda contêm dados.

Após receber o acesso ao canal por meio do protocolo CSMA/CA, o nó deve, então, executar um algoritmo para nomear um transmissor secundário, isto é feito a partir das informações extraídas da tabela. O algoritmo, por sua vez, prioriza os nós mais próximos que possuem dados a serem transmitidos.

FD-MAC (2013) - O protocolo proposto por Kim *et al.* [74] também é o mais novo dos três protocolos chamados de FD-MAC. Baseado no padrão IEEE 802.11 e diferente da versão proposta por Jain *et al.* em 2011 [43], esta versão do FD-MAC emprega os pacotes RTS e CTS do protocolo IEEE 802.11 com a finalidade de reservar o canal para uma transmissão primária e, deste modo, mitigar o problema do terminal escondido. Esta decisão de Kim *et al.* se baseia no fato que utilizar sinais *busy tone* para evitar colisão no receptor primário é um desperdício de energia. Como pode ser observado na Figura 4.12, o FD-MAC inicia a transmissão exatamente como o 802.11, ou seja, anuncia a vontade de realizar uma transmissão por meio de um pacote RTS. Semelhantemente, o nó destino deve responder com um pacote CTS caso o dispositivo possa receber dados sem que estes sofram colisão devido a transmissão de nós vizinhos.

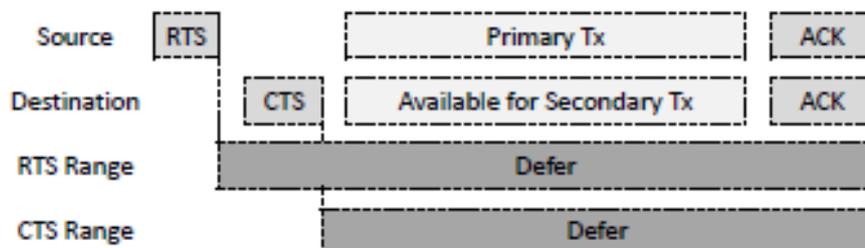


Figura 4.12: Comunicação *full-duplex* do protocolo FD-MAC [74].

A partir do início da transmissão primária o nó destinatário pode iniciar uma transmissão secundária imediatamente sem a necessidade de transmitir pacotes de controle adicionais. En-

tretanto, esta transmissão fica limitada ao tamanho da transmissão primária visto que uma troca de pacotes ACKs é realizada ao fim desta transmissão. Apesar da vantagem de ser necessário uma simples modificação este protocolo tem a desvantagem de não permitir conexões em modo *full-duplex* unilaterais. Contudo, o trabalho de Kim *et al.* apresenta uma boa análise desta adaptação quanto a eficiência de banda, energia por bit, atrasos e vazão.

DAFD-MAC (2014) - O protocolo *full-duplex* assíncrono direcional, do inglês *directional asynchronous full-duplex* [75], intenciona resolver o problema da colisão na transmissão do secundário. Este problema surge quando o receptor secundário é impossibilitado de receber dados devido à presença de outra transmissão em andamento. A transmissão em andamento pode ser inclusive a transmissão primária, como observado na Figura 4.13a. Consequentemente, a transmissão secundária unilateral não pode prosseguir.

Em seu trabalho Sugiyama *et al.* propõe o uso de antenas direcionais de modo a melhorar as chances de sucesso do protocolo em estabelecer uma segunda transmissão. Para tanto, todos os nós da rede precisam se comunicar através de antenas direcionais e, além disso, devem conhecer a localização de todos os dispositivos circunvizinhos através de um algoritmo como o ângulo de chegada (*arrival angle - AOA*) [76] ou sistema de posicionamento global (GPS) [77]. Assim, o DAFD-MAC atua como um mecanismo de cinco tempos (*five-way handshake*), como indicado na Figura 4.14.

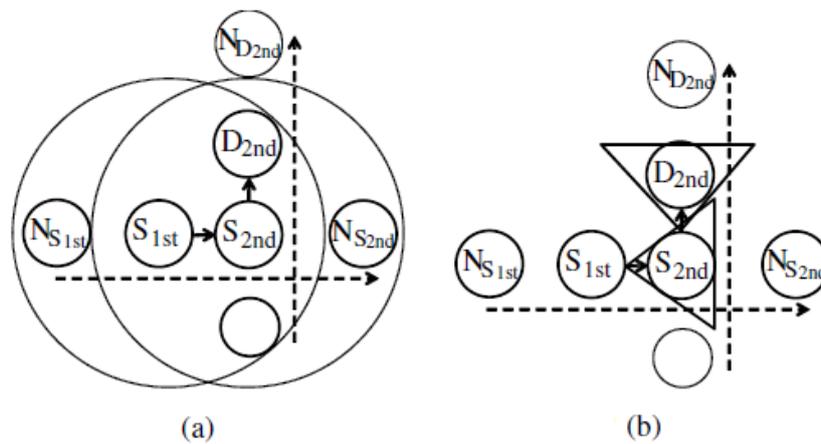


Figura 4.13: O problema da colisão em transmissões secundárias [75].
(a) Colisão em transmissões secundárias. (b) Solução com antenas direcionais.

Como observado em (1) na Figura 4.14, o transmissor primário deve iniciar a conexão enviando RTS assim como no protocolo CSMA/CA. O receptor primário automaticamente

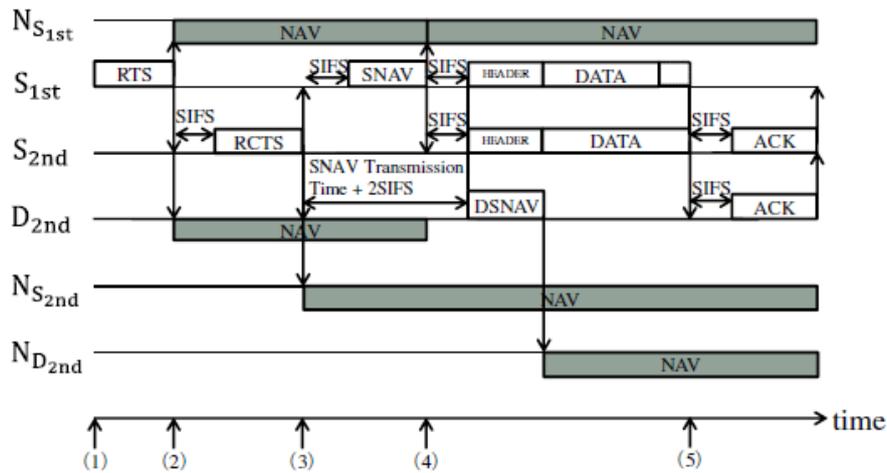


Figura 4.14: Comunicação *full-duplex* unilateral no DAFD-MAC [75].

recebe permissão de estabelecer uma transmissão secundária e indica o nó de destino por meio do RCTS, o qual exerce o papel de CTS no protocolo DAFD-MAC.

Ao receber o pacote RCTS em (3), o transmissor primário envia um SNAV indicando o tempo de término da transmissão primária. Em seguida, o transmissor secundário também indica o tempo da transmissão secundária por meio do pacote DSNNAV. Posteriormente, em (4) os transmissores iniciam a transferência direcionada ao destinatário como visto na Figura 4.13b. Por fim, (5) indica que ambos receptores trocam ACKs por meio da comunicação direcional.

Apesar dos altos custos computacionais o DAFD-MAC apresentou em suas simulações o dobro de vazão de outros protocolos como FD-MAC [43] e MFD-MAC. Adicionalmente, a taxa de colisão foi reduzida a aproximadamente metade dos demais.

Vermeulen *et al.* (2014) - Tendo em vista as redes de sensores sem fio, Vermeulen *et al.* [78] propõe um novo protocolo MAC baseado no protocolo IEEE 802.15.4. A ideia chave deste protocolo parte da percepção que o protocolo CSMA/CA, amplamente empregado em redes sem fio, determina que um nó escute o canal por dois intervalos de tempo antes de tentar obter acesso ao meio. Consequentemente, um nó seria capaz de detectar uma colisão realizando uma escuta do canal durante os dois primeiros intervalos de sua transmissão, visto que nos intervalos seguintes os demais nós da rede verificariam uma transmissão em andamento e entrariam em estado de *backoff*.

Adicionalmente, com o propósito de mitigar o problema do terminal escondido, no protocolo proposto por Vermeulen *et al.* os nós receptores devem transmitir um pacote “bobo” (*dummy*

packet) durante a recepção de um pacote, de modo a sinalizar aos vizinhos que o canal permanece ocupado. Adicionalmente, este pacote permite detectar a colisão de pacotes. Ao detectar uma colisão, o receptor interrompe a transmissão destes pacotes indicando, assim, a falha ao nó transmissor. Do ponto de vista dos nós transmissores, o pacote “bobo” é facilmente identificado, através da escuta do canal, como sendo de origem de seu receptor permitindo ao nó fonte economizar energia no decorrer de uma colisão ao perceber a ausência deste sinal no meio.

RTS/FCTS-MAC (2013) - O protocolo RTS/FCTS-MAC [79] é baseado na utilização do mecanismo de *handshake* request-to-send (RTS) e *full-duplex* clear-to-send (CTS). De forma sugestiva o protocolo modifica o pacote CTS do padrão IEEE 802.11 DCF, de modo a incluir os campos endereços da fonte e do destino representando respectivamente os agentes das transmissões primárias e secundárias no cabeçalho dos pacotes FCTS. Esta adaptação tem o propósito de explorar todas as possibilidades dos rádios *full-duplex*, isto é, permitir comunicações tanto bidirecionais, quanto unidirecionais.

O protocolo RTS/FCTS trabalha de forma semelhante ao CSMA/CA no que se refere a aquisição do canal, ou seja, todo o nó obtém acesso ao canal por meio da transmissão de um pacote RTS, na Figura 4.15 por exemplo, esta ação é efetuada pelo nó A. Ao receber um pacote RTS endereçado a si, em nosso exemplo nó B, o nó verifica a possibilidade de estabelecer uma comunicação bidirecional apurando a existência de pacotes destinados a seu remetente. Em caso afirmativo esta ação é indicada pelo pacote FCTS contendo o endereço do nó destinatário, este por sua vez deve confirmar a transmissão bidirecional respondendo com um pacote FCTS antes da troca simultânea de informações.

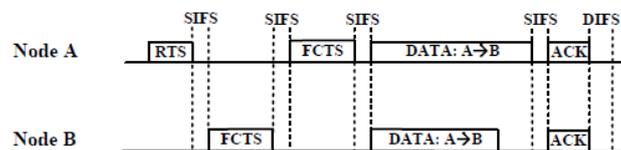


Figura 4.15: Comunicação *full-duplex* Bidirecional do protocolo RTS/FCTS [79].

Entretanto, em casos nos quais o nó destinatário não possui dados para seu remetente, mas os têm para um nó circunvizinho, a comunicação unidirecional é sinalizada por um pacote FCTS no qual o endereço do remetente constitui o endereço da fonte e o endereço do nó receptor secundário está presente no endereço do destinatário, como representado na Figura 4.16, deste modo o transmissor primário reconhece a existência de uma possível transmissão secundária em

curso. Neste cenário, os nós transmissores (primário e secundário) devem aguardar a resposta do receptor secundário enviada por meio de um FCTS proveniente do receptor secundário para iniciar a livre transmissão de dados.

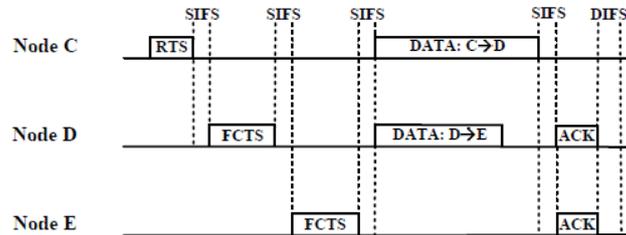


Figura 4.16: Comunicação *full-duplex* unidirecional do protocolo RTS/FCTS [79].

Em ambas as transmissões (bidirecional e unidirecional) o fim da comunicação é marcada pela troca de pacotes ACK em modo *full-duplex* como pode ser notado nos esquemáticos anteriores.

FD-MMAC (2014) - No protocolo multicanal proposto por Zhang *et al.* [80] os nós realizam uma classificação da região para determinar o estado de operação com o propósito de combater o terminal escondido e permitir a comunicação multicanal em terminais expostos. Adicionalmente, com a mesma finalidade, os nós receptores devem emitir um sinal de *beacon* enquanto a recepção dos dados ocorrer de forma bem sucedida.

A classificação da região é feita pelo sensoriamento do canal. Ao sensoriar um *beacon* o nó infere que está em uma região de nós escondidos ao transmissor (RO - *receiver-only region*), na qual apenas a recepção é permitida de modo a evitar interferir na recepção dos dados. Por outro lado, caso a decodificação do sinal não seja possível, o nó deduz que está localizado em uma região de colisão (CO - *collision region*) na qual a interferência foi provavelmente causada pela transmissão simultânea de dados e *beacon*, emitido pelo receptor, e logo o nó não pode realizar nenhuma operação. Por fim, se o nó é capaz de decodificar os dados, este pressupõe que está em uma região de terminal expostos (TO - *transmitter-only region*) na qual apenas a transmissão é permitida. A divisão da região decorrida da comunicação entre os nós A e B pode ser vista na Figura 4.17.

Como demonstrado pelo nó A na Figura 4.17, um nó que almeje transmitir pode fazê-lo, de maneira habitual, caso identifique que o canal está ocioso. Alternativamente, um nó pode realizar uma transmissão, mesmo que o canal esteja ocupado, caso o nó constatare que se encontra em uma região de TO, sendo este cenário representado pelo nó C na Figura 4.17. Caso nenhuma

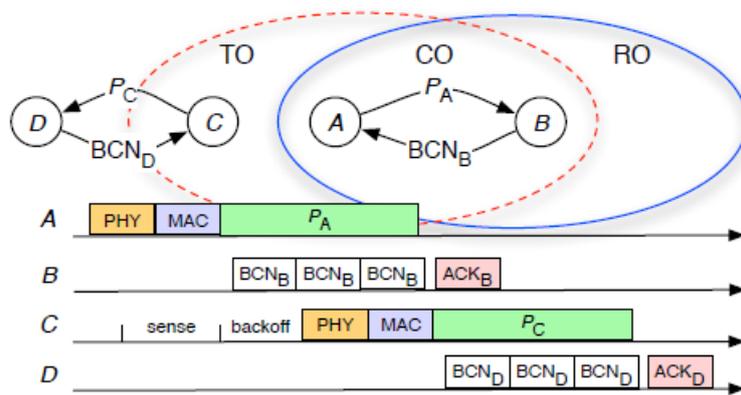


Figura 4.17: Comunicação *full-duplex* do protocolo FD-MMAC [80].

das condições anteriores sejam satisfeitas o nó seleciona um outro canal residente e continua a busca pelo canal de seu destinatário.

Outra configuração se dá quando o nó se apresenta como um terminal escondido, como indicado na Figura 4.18 pelo nó D. Neste caso, o FD-MMAC estabelece que um nó ocioso em uma região TO deve selecionar um canal residente diferente de forma a permitir que outros nós possam descobri-lo em outro canal e conseqüentemente possam transmitir dados. Esta situação ocorre na transmissão entre os nó C e D.

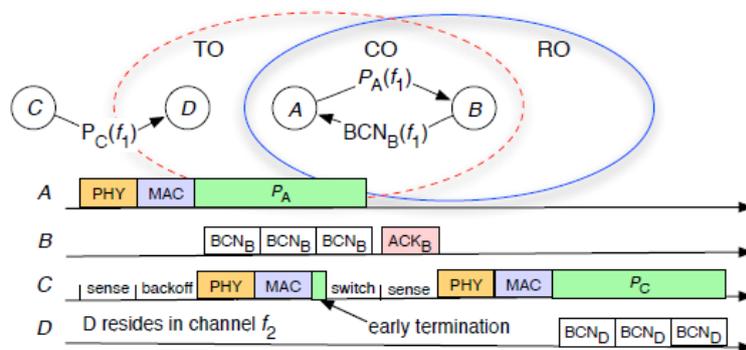


Figura 4.18: Comunicação *full-duplex* FD-MMAC em múltiplos canais [80].

Capítulo 5

Análise Comparativa dos Protocolos e Problemas em Aberto

Neste capítulo, uma análise comparativa expressa na Tabela 5.1 é apresentada. Informações dos protocolos abordados no Capítulo 4 são condensadas na Tabela 5.1. Adicionalmente, uma avaliação referente a problemas em aberto e desafios encontrados pelos protocolos *full-duplex* MAC finaliza o capítulo.

5.1 Comparação dos Protocolos

Na Tabela 5.1 os protocolos são apresentados de maneira ordenada em relação ao ano de publicação. Logo após, observa-se o indicativo quanto a arquitetura da rede a qual exprime a característica de presença e/ou ausência de uma infraestrutura no protocolo proposto. Seguidamente, encontra-se a topologia sugerida representando a capacidade do protocolo de suportar uma topologia centralizada, em que um ou mais dispositivos tem a função de coordenar os demais nós da rede, distribuída, em que a rede não possui um elemento como coordenador ou multissaltos, na qual os elementos podem enviar dados por meio da retransmissão dos mesmos ao longo dos elementos da rede. Informações pertinentes tomadas como base na elaboração de cada um dos protocolos citados é mencionado na coluna seguinte.

Posteriormente, visto que eficiência energética é um fator considerável ao se tratar de protocolos para redes sem fio, descreve-se a informação quanto a preocupação dos autores em relação ao consumo energético do protocolo proposto. Por esta razão, esta noção é retratada na coluna de Eficiência Energética.

A presença de uma camada física em conjunto com o protocolo é manifestada na coluna Camada Física. Uma vez que alguns dos protocolos foram elaborados com efeito da concepção de uma camada física e, muitas vezes, este aspecto tem grande influência na composição de um protocolo MAC o qual tende a capturar as particularidades da camada inferior. As métricas utilizadas durante o trabalho para avaliar os protocolos *full-duplex* são listadas em seguida.

As principais características encontradas nos protocolos estudados são externados, sendo estas frequentemente tidas, também, como principais vantagens dos protocolos a qual se encontra logo após. Em contraste apresenta-se as principais desvantagens de cada um dos protocolos avaliados. Por fim, o meio de validação empregado pelos autores é indicado na última coluna da tabela em questão.

Tabela 5.1: Análise comparativa dos Protocolos

Protocolo/ Referência	Ano	Arquitetura	Topologia	Protocolo Baseado	Eficiência Energética	Camada Física	Métricas Avaliadas	Características	Vantagens	Desvantagens	Validação
ContraFlow [64]	2009	<i>Ad hoc</i>	Distribuída	CSMA/CA	Não	Não	Vazão e Utilidade	Seleção do receptor secundário e proteção das transmissões primárias por emissão de <i>busy tone</i>	Seleção do receptor secundário baseado em taxas de sucesso da transmissão secundária	Transmissões Secundárias Unilaterais desprotegidas quanto ao problema do terminal escondido.	Simulação
Jain <i>et al.</i> [43]	2010	Infraestrutura	Centralizada	CSMA/CA	Não	Sim	Vazão, justiça e capacidade	Primeiro protocolo <i>full-duplex</i> testado em hardware	Simplicidade	Aborda exclusivamente conexões bilaterais	Implementação em WARP V2
Sahai <i>et al.</i> [67]	2011	Infraestrutura	Centralizada	IEEE 802.11 DCF	Não	Sim	Vazão	Conexões <i>full-duplex</i> Assincronas	Nós podem iniciar uma conexão unilateral com uma <i>half-duplex</i> em andamento	complexidade e sobre-escuta	Implementação em WARP
AC-MAC [68]	2012	Infraestrutura	Centralizada	CSMA/CA	Não	Não	Vazão	Controle de janela de contenção		Exclusivamente comunicações <i>full-duplex</i> bidirecionais	Simulação em NS-3
AC-MAC/DCW [68]	2012	Infraestrutura	Centralizada	CSMA/CA	Não	Não	Vazão	Controle de janela de contenção adaptável	Evita o excesso de informações a serem transmitidas	Exclusivamente comunicações <i>full-duplex</i> bidirecionais	Simulação em NS-3

Tabela 5.1: Análise comparativa dos Protocolos (continuação)

Protocolo/ Referência	Ano	Arquitetura	Topologia	Protocolo Baseado	Eficiência Energética	Camada Física	Métricas Avaliadas	Características	Vantagens	Desvantagens	Validação
Goyal <i>et al.</i> [65]	2013	Infraestrutura e <i>Ad hoc</i>	Centralizada e Distribuída	IEEE 802.11 CSMA/CA	Não	Não	Vazão	Exame de inter- ferência entre co- municações <i>full- duplex</i> . Dis- puta justa entre os candidatos a transmissores se- cundários	Maior probabili- dade de sucessos em comunicações unilaterais	Sobre-escuta	Simulação em OPNET
Janus [66]	2013	Infraestrutura	Centralizada	Nenhum	Não	Não	Vazão, justiça e sobrecarga	Transmissão bilateral, mesmo com baixa interferência entre os nós	Explora bem as oportunidades <i>full-duplex</i> e os nós não sofrem colisões durante o período de transmissão	Sobre-escuta e sobrecarga. Não se baseia em ne- hum protocolo existente	Implemen- tação em WARP
FD-MAC [74]	2013	<i>Ad hoc</i>	Distribuída	IEEE 802.11	Sim	Não	Vazão e Energia por bit (eficiência de banda)	Modifica o IEEE 802.11 para trans- missões <i>full-duplex</i>	Simplicidade	Emprega, exclusivamente, transmissões bilaterais. Adi- cionalmente, as transmissões secundárias são limitadas ao tamanho das primárias.	Análise Matemática

Tabela 5.1: Análise comparativa dos Protocolos (continuação)

Protocolo/ Referência	Ano	Arquitetura	Topologia	Protocolo Baseado	Eficiência Energética	Camada Física	Métricas Avaliadas	Características	Vantagens	Desvantagens	Validação
RFD-MAC [73]	2013	<i>Ad hoc</i>	Multissaltos	IEEE 802.11	Não	Não	Vazão e Taxa de conexões <i>full-duplex</i>	Algoritmo de seleção do transmissor secundário	Seleciona trans- missor de modo a evitar colisões nos receptores	Sobre-escutas do canal e necessi- dade de manter dados dos nós vi- zinhos.	Simulação
RTS/FCTS- MAC [79]	2013	<i>Ad hoc</i>	Distribuída	IEEE 802.11 DCF	Não	Não	Vazão	Modifica o pacote CTS para indicar os agentes das transmissões <i>full-duplex</i> primárias e secundárias	Robustez contra o problema do terminal escondido	Sobrecarga durante a troca de pacotes de controle e sobre-escuta	Análise Estatística
DAFD-MAC [75]	2014	<i>Ad hoc</i>	Multissaltos	CSMA/CA	Não	Não	Vazão e taxa de colisão	Emprego de an- tenas direcionais para evitar in- terferência entre nós	Maiores chances de sucesso em transmissões secundárias	Algoritmo custoso que envolve obter a localização dos nós	Simulação
Vermeulen <i>et al.</i> [78]	2014	Rede de Sensores sem fio	Multissaltos	IEEE 802.15.4	Sim	Não	Energia por bit, vazão e atraso	Uma versão do CSMA/CD para redes sem fio	Deteção de colisões e mi- tiga terminal escondido	Não explora a ca- pacidade do <i>full- duplex</i> de melho- rar a vazão. Além de elevar o con- sumo energético em nós receptores	Simulação com MatLab

Tabela 5.1: Análise comparativa dos Protocolos (continuação)

Protocolo/ Referência	Ano	Arquitetura	Topologia	Protocolo Baseado	Eficiência Energética	Camada Física	Métricas Avaliadas	Características	Vantagens	Desvantagens	Validação
Tang and Wang [69]	2014	Infraestrutura	Centralizada	IEEE 802.11 DCF	Não	Não	Vazão	Comunicação <i>full-duplex</i> mesmo em situações em que ocorre colisão de pacotes	Transmissões unilaterais com nós que não formam terminal escondido entre si	Não explora to- das as possibi- lidades do <i>full- duplex</i> , como a comunicação bila- teral e a unila- teral baseada na fonte	Simulação com MatLab
Duarte <i>et al.</i> [47]	2014	Infraestrutura	Centralizada	IEEE 802.11 DCF	Não	Sim	Vazão efe- tiva	Busca em fila de transmissão para identifi- car situações propícias ao <i>full-duplex</i>	Justiça entre os nós e suporte a comunicações <i>half-duplex</i> em conjunto com a <i>full-duplex</i>	Não explora co- nexões <i>full-duplex</i> unilaterais	Simulação com OPNET
FD-MMAC [80]	2014	<i>Ad hoc</i>	Distribuída	CSMA/CA	Não	Não	Vazão, atraso, justiça e balancea- mento de carga	Classificação de Regiões pelos nós permitindo a transmissão em terminais expos- tos e recepção em terminais escondidos	Robustez contra o problema do terminal exposto e escondido	Não explora co- nexões <i>full-duplex</i> unilaterais	Simulação com OPNET

Tabela 5.1: Análise comparativa dos Protocolos (continuação)

Protocolo/ Referência	Ano	Arquitetura	Topologia	Protocolo Baseado	Eficiência Energética	Camada Física	Métricas Avaliadas	Características	Vantagens	Desvantagens	Validação
PoCMAC [72]	2015	Infraestrutura	Centralizada	IEEE 802.11	Não	Não	Vazão e justiça	Avaliação da interferência entre clientes para otimização da potência de transmissão	Maior probabili- dade de sucesso em transmissões secundárias de- vido ao controle de potência	Não explora co- nexões <i>full-duplex</i> bilaterais e Com- plexidade do pro- tocolo	Simulação com MatLab e Implementa- ção com WARP

No que se refere aos protocolos *full-duplex* para redes infraestruturadas, nota-se que os protocolos iniciais como em [67, 64, 68] se esforçam em promover soluções que explorem as diferentes topologias *full-duplex*. Em contrapartida, os protocolos mais recentes procuram ampliar as chances de sucessos em comunicações secundárias.

Apesar de mais complexos que seus antecessores, os protocolos de Tang & Wang [69] e PoCMAC [72] os quais empregam, respectivamente, mecanismos de efeito de captura e controle de potência, tais protocolos apresentam maiores vantagens a esta arquitetura, à medida que ampliam a taxa de sucessos em comunicações simultâneas sendo a sobre-escuta a desvantagem a principal perda destes protocolos, além da complexidade. O protocolo Janus [66], por sua vez, adota a abordagem de escalonamento entre transmissões, esta estratégia apresenta-se mais interessante devido à simplicidade em relação aos dois últimos protocolos. Contudo, a implementação desta estratégia ostenta provoca um maior grau de sobre-escuta e sobrecarga que os demais.

Por outro lado, os protocolos destinados a arquiteturas *ad hoc* se segmentam entre abordagens de acordo com o acesso ao meio. Enquanto estratégias de acesso aleatório como em [64, 78] demonstram maior flexibilidade a rede à medida que permitem a formação das comunicações *full-duplex* de modo mais espontâneo. Entretanto, esta estratégia esta mais suscetível a colisões e ao problema do terminal escondido sendo necessário à utilização de sinais *busy tone* o qual representam um gasto energético a rede. As abordagens com trocas de pacotes de controle nas quais se destacam os protocolos Goyal *et al.* [65] e RTS/FCTS-MAC [79] por apresentarem alterações mais singelas ao protocolo CSMA/CA, são mais robustas ao problema do terminal escondido. Devido às modificações mais pontuais, o protocolo Goyal *et al.* demonstra ser mais vantajoso que o RTS/FCTS-MAC, visto que ao estudar ambos os mecanismos nota-se que o primeiro deve resultar em sobrecargas menores em relação ao segundo. Todavia, estes protocolos apresentam a desvantagem de não permitir a formação de comunicações assíncronas o que restringe a capacidade de transmissão da rede.

Um recurso mais interessante pode ser visto no protocolo FD-MMAC o qual se aproveita de técnicas de multicanal em conjunto com acesso aleatório ao meio de modo a obter uma abordagem mais balanceada em relação às anteriores.

5.2 Problemas em Aberto

Nesta seção alguns desafios identificados na literatura serão abordados, a fim de apresentar algumas diretrizes para pesquisas futuras, que devem ser consideradas no estudo e concepção de protocolos *full-duplex* MAC para redes sem fio.

Seleção do Receptor Secundário

A dificuldade em selecionar um receptor secundário encontra-se na possível ocorrência de uma interferência em comunicações *full-duplex* unilaterais. Nas comunicações baseadas no destinatário, a colisão de pacotes pode transcorrer na recepção do nó receptor secundário proveniente da transmissão primária. Esta situação é agravada em comunicações baseadas na fonte uma vez que os papéis se invertem, tendo como origem a transmissão secundária, a colisão se daria no receptor primário se configurando em um grave problema de justiça, pois não foi garantido o direito de transmissão ao nó detentor do canal.

Como em todas situações de colisão de pacotes, estes cenários representariam um desperdício de energia por parte do transmissor secundário, visto que a retransmissão dos dados seria necessária. Em função desta realidade, é fundamental para os protocolos de controle de acesso eleger prudentemente os receptores secundários em comunicações *full-duplex* unilaterais.

Em redes infraestruturadas, esta problemática torna-se gerenciável a medida que uma unidade de controle central da rede é capaz de avaliar e contornar tais situações [66, 72, 69]. Em redes *ad hoc*, entretanto, a natureza distribuída da rede demanda estratégias mais complexas permanecendo uma questão em aberto.

O Problema do Terminal Escondido Residual

Como abordado no início do Capítulo 4, a simetria no que se refere ao tamanho dos pacotes de dados a serem trocados em comunicação *full-duplex* ocorre de forma esporádica na prática. Em tais situações, algumas adversidades surgem em protocolos *full-duplex* MAC.

Em protocolos de acesso ao meio baseado em contenção, a assimetria das transmissões ocasiona o problema do terminal escondido residual, como é referido por Thilina *et al.* [54]. Este problema se dá pelo fato de que um dos nós da comunicação continua a receber dados, porém ao sensorar o canal, nós vizinhos ao mesmo não são capazes de identificar uma transmissão em andamento e, por esse motivo, podem interferir ao tentar obter o canal. Uma solução

amplamente explorada na literatura é o emprego de sinais *busy tones* até que a transmissão seja finalizada para efeito de demonstrar a ocupação do canal [67, 65, 78, 80, 69]. Esta abordagem, no entanto, não é energeticamente eficiente visto que operações de transmissão em redes sem fio são as mais custosas energeticamente, reivindicando maiores estudos para solucionar tal problema.

Determinação de Modos de Transmissão *Full-Duplex*

Em redes sem fio, os protocolos de acesso ao meio precisam se ajustar de forma a prover as necessidades da aplicação para a qual a rede foi projetada. Algumas aplicações exigem maiores capacidades de transmissão, como as de áudio e vídeo, enquanto outras possuem requisitos rígidos de tempo.

Em transmissões *full-duplex*, a rede pode assumir as várias configurações observadas na Figura 3.5 e naturalmente cada uma possui pontos positivos e negativos a depender da aplicação para a qual a rede está sendo planejada. Apesar disso, a literatura em *full-duplex* MAC carece de estudos e protocolos capazes de deliberar entres os diferentes modos de comunicação de forma a beneficiar a camada de aplicação.

Justiça entre os Nós

Assim como demais protocolos de controle de acesso, a justiça entre os nós é uma questão fundamental para os protocolos *full-duplex* MAC. Entretanto, esse aspecto é mais complexo em comunicação *full-duplex* devido, principalmente, a presença de uma transmissão secundária. Em cenários em que dois nós sempre dispõem de dados a serem trocados entre si, os protocolos *full-duplex* MAC devem garantir que tais nós não conquistem acesso ao meio de forma contínua, uma vez que tal configuração impossibilitaria aos nós vizinhos a ambos de obterem acesso ao meio provocando, deste modo, as situações de *harvesting*.

Resolução de Contenção em Transmissões Assíncronas

A transmissão assíncrona ocorre geralmente em transmissões unilaterais baseada na fonte. No cenário em que existe um dispositivo com uma transmissão em curso, a resolução de contenção do canal de modo a permitir que nós transmitam ao transmissor primário sem colisão de pacotes é um desafio no desenvolvimento de protocolos *full-duplex* visto que o sensoreamento do

canal não é possível devido a transmissão em andamento [64]. Além disso, pelo mesmo motivo, a implementação de técnicas tradicionais via troca de pacotes RTS/CTS é inviável [54].

Dispositivos Legados

Apesar dos avanços animadores, não é possível presumir quando a tecnologia de rádio *full-duplex* estará acessível em aparelhos de rádios comerciais. Ainda assim, mesmo que tal inovação fosse acessível comercialmente em um prazo relativamente curto, tal fato não implica no imediato desuso dos dispositivos legados que operam em modo *half-duplex*. Em vista disso, a fim de uma melhor adaptação das técnicas *full-duplex*, os protocolos *full-duplex* MAC necessitam assegurar que ambas as tecnologias de rádio coexistam em uma mesma rede sem fio.

Como pode ser observado no Capítulo 4, esta adversidade é facilmente superada pelos protocolos *full-duplex* para redes infraestruturadas ao restringir que somente o ponto de acesso desfrute de rádios *full-duplex*. Entretanto, esta limitação também reduz a capacidade dos protocolos de explorarem as possibilidades concedidas pelos avanços na camada física. Adicionalmente, esta questão ainda é um problema em aberto em protocolos destinados as redes *ad hoc* sendo um ponto a ser investigado por protocolos futuros.

Modelagens e Avaliações Realísticas

A simulação é a forma de validação mais utilizada na análise de um protocolo. Durante o desenvolvimento dos protocolos, a simulação também permite identificar lacunas no projeto, permitindo, assim, a proposição de mecanismos de controle de acesso mais eficientes. Contudo, tal ferramenta não é capaz de retratar todas as particularidades da camada física principalmente no que se refere aos rádios *full-duplex* nos quais imperfeições nos componentes eletrônicos dos circuitos transmissores são responsáveis por sinais autointerferentes remanescentes nos circuitos receptores. Por isso, é essencial, para o desenvolvimento de novos protocolos, considerar em modelos de validação tanto os efeitos da propagação eletromagnética dos rádios quanto suas imperfeições. Adicionalmente, a maioria dos protocolos estudados realiza análise comparativa com o protocolo CSMA/CA de maneira que a avaliação de desempenho dos protocolos é exercida dispondo de modo de comunicação *half-duplex* e, conseqüentemente, de um modelo antigo de rádio como referência. Conforme os primeiros trabalhos em *full-duplex*, é esperado que um protocolo empregando tal comunicação obtivesse desempenhos superiores ao modo de comunicação *half-duplex* [6, 43, 67, 74, 66].

Em prol do avanço científico, é almejado que as análises das métricas avaliadas considere os protocolos *full-duplex* MAC anteriores a fim de que os principais fatores positivos e negativos sejam externados promovendo, desta forma, o incentivo a melhorias nos protocolos presentes no estado-da-arte.

Capítulo 6

Conclusão

Neste trabalho, os principais conceitos referentes à comunicação *full-duplex* são apresentados, onde esta nova tecnologia oferece um grande potencial para revolucionar as redes sem fio. Dos benefícios aqui apontados pode-se destacar o aumento da capacidade de transmissão e a redução da latência média da rede. Estes fatores motivaram a elaboração de novos protocolos de controle de acesso ao meio com a finalidade de adaptar a rede aos recém-formulados rádios *full-duplex*.

Das diferentes abordagens empregadas na concepção dos protocolos de controle de acesso destinadas a tais rádios, foram revisitados neste trabalho os principais protocolos encontrados na literatura. Os protocolos explanados foram classificados quanto à arquitetura da rede para as quais o desenvolvimento teve finalidade. Frequentemente, os protocolos estudados objetivavam capturar a essência de uma arquitetura como um todo. Esse intuito, apesar de parecer vantajoso inicialmente, levou a uma análise limitada em alguns pontos essenciais, visto que, outros fatores como topologia, mas sobretudo a aplicação de destino da rede não foram considerados e, conseqüentemente, aspectos relevantes da rede não foram levantados.

Em se tratando dos protocolos para redes infraestruturadas, a presença de uma unidade de controle da rede permitiu uma evolução vertiginosa dos protocolos *full-duplex* MAC nestas arquiteturas. Tais protocolos, geralmente, envolvem a adaptação do protocolo CSMA/CA à problemática incorporando algoritmos complexos, os quais são capazes de superar adversidades como a interferência entre nós vizinhos e a assimetria entre os pacotes de dados em comunicações *full-duplex*.

As redes *ad hoc*, por outro lado, por terem natureza distribuída, exigem soluções minuciosas. O fato de apresentarem um caráter descentralizado leva, intuitivamente, a adoção de abordagens

de acesso ao meio de modo aleatório. Entretanto, ao propor táticas para mitigar o problema do terminal escondido em conjunto com o acesso aleatório, vários autores empregaram mecanismos de transmissão de sinais *busytones*. Ainda que esta seja uma solução eficiente para o problema, esta estratégia é inconveniente em redes que apresentam restrições energéticas como as redes de sensores e Internet das Coisas.

Em suma, estratégias capazes de desfrutar ao máximo da tecnologia dos rádios *full-duplex* sem irromper em efeitos negativos a rede, como sobrecarga e sobre-escuta, é um trabalho complexo. Provavelmente, uma melhor aproximação a esta questão não se encontra em empregar as tecnologias *full-duplex* de forma isolada, mas em associação com outras abordagens, como as de múltiplas entradas e múltiplas saídas (*MIMO*, do inglês *multiple-input-multiple-output*) e as multicanais, de modo que pontos desfavoráveis sejam mitigados a medida que as técnicas se complementam.

As principais informações dos protocolos discutidos neste trabalho são resumidas em uma tabela a qual apresenta, também, as principais vantagens e desvantagens identificadas em tais abordagens. Este esquemático procura permitir uma consulta rápida ao estado-da-arte em se tratando dos protocolos *full-duplex* MAC. Adicionalmente, alguns pontos observados como em aberto na literatura foram debatidos a fim de contribuir com o desenvolvimento de protocolos mais eficientes nesta área.

Finalmente, pode-se concluir que desenvolver novos protocolos para comunicações sem fio em modo *full-duplex* provou-se uma atividade tão desafiadora quanto proveitosa, uma vez que modificações na arquitetura, topologia ou aplicação das redes alteram os diversos requisitos e restrições a serem considerados. Em virtude do que foi mencionado, este trabalho contribui com a apresentação de uma análise comparativa das estratégias propostas para explorar os benefícios de rádios *full-duplex* acentuando suas principais características, bem como, vantagens e desvantagens, com o propósito de auxiliar no estudo de protocolos *full-duplex* referentes a redes sem fio.

Referências Bibliográficas

- [1] Agência Nacional de Telecomunicações, “Brasil tem 236 milhões de linhas móveis.” <http://www.anatel.gov.br/dados/destaque-1/283-brasil-tem-236-2-milhoes-de-linhas-moveis-em-janeiro-de-2018>, 2018. Acessado: 2018-03-13.
- [2] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, “Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.
- [3] P. Leone, M. Papatriantafidou, E. M. Schiller, and G. Zhu, “Chameleon-mac: adaptive and self-algorithms for media access control in mobile ad hoc networks,” in *Symposium on Self-Stabilizing Systems*, pp. 468–488, Springer, 2010.
- [4] P. Agrawal, J.-C. Chen, and K. M. Sivalingam, “Energy efficient protocols for wireless systems,” in *Wireless Multimedia Network Technologies*, pp. 187–204, Springer, 2002.
- [5] A. Goldsmith, *Wireless communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [6] B. Radunovic, D. Gunawardena, A. Proutiere, N. Singh, V. Balan, and P. Key, “Efficiency and fairness in distributed wireless networks through self-interference cancellation and scheduling,” *Microsoft Research, Cambridge, UK, Technical Report*, 2009.
- [7] F. Tobagi and L. Kleinrock, “Packet switching in radio channels: part ii—the hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 23, no. 12, pp. 1417–1433, 1975.
- [8] A. Jayasuriya, S. Perreau, A. Dadej, and S. Gordon, “Hidden vs exposed terminal problem in ad hoc networks,” in *Proceedings of Australian Telecommunication Networks and Applications Conference*, 2004.

- [9] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, “Full duplex radios,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 43, no. 4, pp. 375–386, 2013.
- [10] N. Abramson, “The aloha system: another alternative for computer communications,” in *AFIPS (Fall) Proceedings of the November 17-19, Fall Joint Computer Conference*, pp. 281–285, ACM, 1970.
- [11] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.
- [12] Z. Rong and T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*. Prentice Hall, 1996.
- [13] C. S. R. Murthy and B. Manoj, *Ad hoc wireless networks: Architectures and protocols*. Pearson education, 2004.
- [14] B. P. Lathi, *Modern digital and analog communication systems*. Oxford University Press, Inc., 1990.
- [15] D. Plassmann, “Location management strategies for mobile cellular networks of 3rd generation,” in *The 44th Vehicular Technology Conference*, pp. 649–653, IEEE, 1994.
- [16] J. Oetting, “Cellular mobile radio,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 21, no. 8, pp. 10–15, 1983.
- [17] J. Hoebeke, I. Moerman, B. Dhoedt, and P. Demeester, “An overview of mobile ad hoc networks: applications and challenges,” *Journal-Communications Network*, vol. 3, no. 3, pp. 60–66, 2004.
- [18] Wi-Fi Alliance, “Wi-fi Alliance.” <http://www.wi-fi.org>, 2018.
- [19] B. P. Crow, I. Widjaja, J. G. Kim, and P. T. Sakai, “IEEE 802.11 wireless local area networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 9, pp. 116–126, 1997.
- [20] K. Pahlavan, T. H. Probert, and M. E. Chase, “Trends in local wireless networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 33, no. 3, pp. 88–95, 1995.
- [21] Bluetooth, “Bluetooth.” <https://www.bluetooth.com>, 2018.
- [22] E. Ferro and F. Potorti, “Bluetooth and wi-fi wireless protocols: a survey and a comparison,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 12, no. 1, pp. 12–26, 2005.

- [23] A. F. Molisch, K. Balakrishnan, D. Cassioli, C.-C. Chong, S. Emami, A. Fort, J. Karedal, J. Kunisch, H. Schantz, U. Schuster, *et al.*, “IEEE 802.15.4a channel model-final report,” Tech. Rep. 04, IEEE, 2004.
- [24] R. Soua and P. Minet, “Multichannel assignment protocols in wireless sensor networks: A comprehensive survey,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 16, pp. 2–21, 2015.
- [25] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [26] F. Cunha, L. Villas, A. Boukerche, G. Maia, A. Viana, R. A. Mini, and A. A. Loureiro, “Data communication in VANETs: Protocols, applications and challenges,” *Ad Hoc Networks*, vol. 44, pp. 90–103, 2016.
- [27] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, vol. 12, no. 3, pp. 493–506, 2004.
- [28] S. F. Solehria and S. Jadoon, “Medium access control protocol for wireless sensor network—a survey,” *International Journal of Video & Image Processing and Network Security IJVIPNS-IJENS*, vol. 11, no. 03, pp. 14–18, 2011.
- [29] A. C. V. Gummalla and J. O. Limb, “Wireless medium access control protocols,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 3, no. 2, pp. 2–15, 2000.
- [30] G. P. Halkes, T. Van Dam, and K. Langendoen, “Comparing energy-saving mac protocols for wireless sensor networks,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 10, no. 5, pp. 783–791, 2005.
- [31] L. Kleinrock and F. Tobagi, “Packet switching in radio channels: Part i—carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 23, no. 12, pp. 1400–1416, 1975.
- [32] J. D. Gibson, *The mobile communications handbook*. CRC press, 2012.
- [33] M. Gast, *802.11 wireless networks: the definitive guide*. ”O’Reilly Media, Inc.”, 2005.
- [34] W. C. Lynch, “Computer systems: Reliable full-duplex file transmission over half-duplex telephone line,” *Communications of the ACM*, vol. 11, no. 6, pp. 407–410, 1968.

- [35] V. Koll and S. Weinstein, “Simultaneous two-way data transmission over a two-wire circuit,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 21, no. 2, pp. 143–147, 1973.
- [36] M. Duarte and A. Sabharwal, “Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: Feasibility and first results,” in *Conference Record of The 44th Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, pp. 1558–1562, IEEE, 2010.
- [37] T. Zahir, K. Arshad, A. Nakata, and K. Moessner, “Interference management in femto-cells,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 293–311, 2013.
- [38] A. Sabharwal, P. Schniter, D. Guo, D. W. Bliss, S. Rangarajan, and R. Wichman, “In-band full-duplex wireless: Challenges and opportunities,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 9, pp. 1637–1652, 2014.
- [39] J. I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, “Achieving single channel, full duplex wireless communication,” in *Proceedings of The 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 1–12, ACM, 2010.
- [40] B. Debaillie, D.-J. van den Broek, C. Lavin, B. van Liempd, E. A. Klumperink, C. Palacios, J. Craninckx, B. Nauta, and A. Pärssinen, “Analog/rf solutions enabling compact full-duplex radios,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 9, pp. 1662–1673, 2014.
- [41] D. Kim, H. Lee, and D. Hong, “A survey of in-band full-duplex transmission: From the perspective of phy and mac layers,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2017–2046, 2015.
- [42] M. E. Knox, “Single antenna full duplex communications using a common carrier,” in *The 13th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, pp. 1–6, IEEE, 2012.
- [43] M. Jain, J. I. Choi, T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, “Practical, real-time, full duplex wireless,” in *Proceedings of The 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 301–312, ACM, 2011.
- [44] M. Duarte, C. Dick, and A. Sabharwal, “Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 12, pp. 4296–4307, 2012.

- [45] D. Bharadia and S. Katti, “Full duplex mimo radios,” in *The 11th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation*, pp. 359–372, 2014.
- [46] N. Phungamngern, P. Uthansakul, and M. Uthansakul, “Digital and rf interference cancellation for single-channel full-duplex transceiver using a single antenna,” in *The 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, pp. 1–5, IEEE, 2013.
- [47] M. Duarte, A. Sabharwal, V. Aggarwal, R. Jana, K. Ramakrishnan, C. W. Rice, and N. Shankaranarayanan, “Design and characterization of a full-duplex multiantenna system for wifi networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 3, pp. 1160–1177, 2014.
- [48] D. Halperin, T. Anderson, and D. Wetherall, “Taking the sting out of carrier sense: interference cancellation for wireless lans,” in *Proceedings of The 14th International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 339–350, ACM, 2008.
- [49] S. Katti, S. Gollakota, and D. Katabi, “Embracing wireless interference: Analog network coding,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 37, no. 4, pp. 397–408, 2007.
- [50] S. Gollakota and D. Katabi, “Zigzag decoding: combating hidden terminals in wireless networks,” in *Proceedings of The Conference on Data Communication (SIGCOMM)*, ACM, 2008.
- [51] D. Bliss, P. Parker, and A. Margetts, “Simultaneous transmission and reception for improved wireless network performance,” in *The 14th Workshop on Statistical Signal Processing*, pp. 478–482, IEEE, 2007.
- [52] T. Riihonen, S. Werner, and R. Wichman, “Spatial loop interference suppression in full-duplex mimo relays,” in *Conference Record of The 43rd Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, pp. 1508–1512, IEEE, 2009.
- [53] T. Riihonen, S. Werner, and R. Wichman, “Residual self-interference in full-duplex mimo relays after null-space projection and cancellation,” in *Conference Record of The 44th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, pp. 653–657, IEEE, 2010.

- [54] K. M. Thilina, H. Tabassum, E. Hossain, and D. I. Kim, “Medium access control design for full duplex wireless systems: challenges and approaches,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 5, pp. 112–120, 2015.
- [55] H. Ju, X. Shang, H. V. Poor, and D. Hong, “Bi-directional use of spatial resources and effects of spatial correlation,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 10, pp. 3368–3379, 2011.
- [56] H. Ju, D. Kim, H. V. Poor, and D. Hong, “Bi-directional beamforming and its capacity scaling in pairwise two-way communications,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 1, pp. 346–357, 2012.
- [57] D. Kim, S. Park, H. Ju, and D. Hong, “Transmission capacity of full-duplex-based two-way ad hoc networks with arq protocol,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 7, pp. 3167–3183, 2014.
- [58] H. Ju, E. Oh, and D. Hong, “Catching resource-devouring worms in next-generation wireless relay systems: Two-way relay and full-duplex relay,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 9, 2009.
- [59] H. Ju, S. Lim, D. Kim, H. V. Poor, and D. Hong, “Full duplexity in beamforming-based multi-hop relay networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 8, pp. 1554–1565, 2012.
- [60] G. Zheng, I. Krikidis, J. Li, A. P. Petropulu, and B. Ottersten, “Improving physical layer secrecy using full-duplex jamming receivers,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 20, pp. 4962–4974, 2013.
- [61] S. Vishwakarma and A. Chockalingam, “Sum secrecy rate in miso full-duplex wiretap channel with imperfect csi,” in *Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1–6, IEEE, 2015.
- [62] O. Cepheli, S. Tedik, and G. K. Kurt, “A high data rate wireless communication system with improved secrecy: Full duplex beamforming,” *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 6, pp. 1075–1078, 2014.
- [63] X. Kang, C. K. Ho, and S. Sun, “Full-duplex wireless-powered communication network with energy causality,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 10, pp. 5539–5551, 2015.

- [64] N. Singh, D. Gunawardena, A. Proutiere, B. Radunovi, H. V. Balan, and P. Key, “Efficient and fair mac for wireless networks with self-interference cancellation,” in *International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, pp. 94–101, IEEE, 2011.
- [65] S. Goyal, P. Liu, O. Gurbuz, E. Erkip, and S. Panwar, “A distributed mac protocol for full duplex radio,” in *Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, pp. 788–792, IEEE, 2013.
- [66] J. Y. Kim, O. Mashayekhi, H. Qu, M. Kazandjieva, and P. Levis, “Janus: A novel mac protocol for full duplex radio,” *Computer Science Technical Reports (CSTR)*, vol. 2, no. 7, p. 23, 2013.
- [67] A. Sahai, G. Patel, and A. Sabharwal, “Pushing the limits of full-duplex: Design and real-time implementation,” *arXiv preprint arXiv:1107.0607*, 2011.
- [68] S. Oashi and M. Bandai, “Performance of medium access control protocols for full-duplex wireless lans,” in *The 9th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies (APSITT)*, pp. 1–4, IEEE, 2012.
- [69] A. Tang and X. Wang, “Medium access control for a wireless lan with a full duplex ap and half duplex stations,” in *Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 4732–4737, IEEE, 2014.
- [70] J. Lee, W. Kim, S.-J. Lee, D. Jo, J. Ryu, T. Kwon, and Y. Choi, “An experimental study on the capture effect in 802.11 a networks,” in *Proceedings of The 2nd International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization*, pp. 19–26, ACM, 2007.
- [71] K. Whitehouse, A. Woo, F. Jiang, J. Polastre, and D. Culler, “Exploiting the capture effect for collision detection and recovery,” in *The 2nd Workshop on Embedded Networked Sensors. EmNetS-II.*, pp. 45–52, IEEE, 2005.
- [72] W. Choi, H. Lim, and A. Sabharwal, “Power-controlled medium access control protocol for full-duplex wifi networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 7, pp. 3601–3613, 2015.

- [73] K. Tamaki, H. A. Raptino, Y. Sugiyama, M. Bandai, S. Saruwatari, and T. Watanabe, "Full duplex media access control for wireless multi-hop networks," in *The 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1–5, IEEE, 2013.
- [74] S. Kim and W. E. Stark, "On the performance of full duplex wireless networks," in *The 47th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, pp. 1–6, IEEE, 2013.
- [75] Y. Sugiyama, K. Tamaki, S. Saruwatari, and T. Watanabe, "A wireless full-duplex and multi-hop network with collision avoidance using directional antennas," in *The 70th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU)*, pp. 38–43, IEEE, 2014.
- [76] D. Niculescu and B. Nath, "Ad hoc positioning system (APS) using AOA," in *The 22nd Annual Joint Conference of the Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, vol. 3, pp. 1734–1743, IEEE, 2003.
- [77] Y.-B. Ko, V. Shankarkumar, and N. H. Vaidya, "Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks," in *The 19th Annual Joint Conference of The Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, vol. 1, pp. 13–21, IEEE, 2000.
- [78] T. Vermeulen and S. Pollin, "Energy-delay analysis of full duplex wireless communication for sensor networks," in *Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 455–460, IEEE, 2014.
- [79] W. Cheng, X. Zhang, and H. Zhang, "Rts/fcts mechanism based full-duplex mac protocol for wireless networks," in *Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 5017–5022, IEEE, 2013.
- [80] Y. Zhang, L. Lazos, K. Chen, B. Hu, and S. Shivaramaiah, "Fd-mmacc: Combating multi-channel hidden and exposed terminals using a single transceiver," in *International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pp. 2742–2750, IEEE, 2014.