

# FDT-MAC: Reduzindo a latência das comunicações full-duplex em redes móveis sem fio

Lucas de M. Guimarães<sup>1</sup>, Jacir L. Bordim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência da Computação – Universidade de Brasília (UnB)  
70.910-900 – Brasília – DF – Brazil

lucasmg@aluno.unb.br, bordim@unb.br

**Abstract.** *The growing requirement for high-data rate leveraged the studies on the fifth-generation (5G) mobile networks. The designed 5G networks are expected to achieve its goals by devising ways to enhance spectrum usage. Full-duplex antennas and efficient medium access control (MAC) techniques tend to be paramount in the upcoming 5G networks. In this context, this work proposes a MAC layer technique to reduce the latency of channel reservation when full-duplex antennas are considered. Analytical results pointed that the proposed scheme achieved a throughput 156% higher than a state-of-the-art full-duplex technique. Regarding to traditional half-duplex antenna MAC protocols, throughput improvement reached up to 412%.*

**Resumo.** *A crescente demanda por largura de banda impulsionou o estudo e o desenvolvimento da quinta geração (5G) de redes móveis. Espera-se que as redes 5G criem mecanismos que permitam uma melhoria no uso do espectro. Antenas full-duplex e técnicas de controle de acesso ao meio (MAC) tendem a ser fundamentais no panorama de redes 5G. Este trabalho propõe uma técnica MAC que reduz a latência da reserva de canal quando se considera o uso de antenas full-duplex. Resultados analíticos indicaram que a técnica proposta obteve ganhos de vazão de até 156% quando comparado com um protocolo do estado da arte projetado para comunicações full-duplex. Quando comparado com esquemas tradicionais half-duplex, o ganho de vazão superou 400%.*

## 1. Introdução

No contexto de redes móveis fio, há uma tendência entre os serviços existentes e potencialmente exploráveis de possuírem demanda rigorosa no que diz respeito a latência (RTT – *Round Trip Time* < 10ms), vazão (a partir de 5 Gb/s) e densidade da rede (até 900 Gb/s/km<sup>2</sup>) [Wang et al. 2015]. Para atender a estas rigorosas exigências e lidar com o aumento da necessidade de banda dos serviços de multimídia, a quinta geração (5G) geração de redes móveis sem fio tem sido apontada como uma alternativa viável em estudos de diversas áreas [Tang et al. 2016]. Como exemplo de serviços a serem beneficiados pelas vantagens decorrentes da adoção do 5G, podem-se citar os seguintes: Internet das coisas, redes veiculares e computação móvel baseada em nuvem [Wang et al. 2015].

Embora a adoção do 5G possa prover diversas vantagens, ela também impõe uma série de desafios a serem superados, tais como o aumento massivo da quantidade de dispositivos acessando o espectro, do volume de dados e dos serviços que se baseiam em informações de tempo real [Wang et al. 2015]. Com o intuito de lidar com estes desafios,

as redes 5G baseiam-se no desenvolvimento de novas técnicas que possibilitem um uso do espectro mais eficiente, permitindo que mais dispositivos utilizem o espectro simultaneamente. Neste contexto, espera-se que o emprego de antenas *full-duplex* possua um papel fundamental nas redes móveis operando sobre 5G [Tang et al. 2016] [Zhang et al. 2015]. O uso de antenas *full-duplex* apresenta diversas vantagens quando comparado com antenas *half-duplex*. Como exemplo dessas vantagens, destaca-se o aumento da vazão que resulta também em uma redução do atraso fim-a-fim [Zhang et al. 2016]. Entretanto, quando contrapostas com as antenas *half-duplex*, as antenas *full-duplex* possuem maior taxa de perda de pacote, menor confiabilidade do enlace e requerem uma fila maior para processar os pacotes recebidos [Zhang et al. 2016]. Além disso, as antenas *full-duplex* sofrem dos efeitos da auto-interferência, isto é, a interferência percebida na antena quando esta está em um mesmo momento transmitindo e recebendo algum sinal [Zhang et al. 2015] [Tang et al. 2016] [Zhang et al. 2016]. Para contornar as limitações resultantes da auto-interferência, diversas técnicas da camada física foram projetadas tornando o uso de antenas *full-duplex* viável [Zhang et al. 2015] [Murad and Eltawil 2017]. Estas técnicas impulsionaram a pesquisa de técnicas de acesso ao meio (MAC) projetadas para antenas *full-duplex*.

Uma abordagem cooperativa para comunicações utilizando antenas *full-duplex* é apresentada no protocolo “Janus” [Kim et al. 2013]. Tal protocolo é centralizado e possui as comunicações iniciadas pelo receptor, tendo como principal meta a maximização da vazão. Janus espera atingir tal objetivo fazendo um agendamento das comunicações de modo a aumentar a probabilidade de que uma antena esteja lidando com mais de uma comunicação ao mesmo tempo. Para isso, o protocolo utiliza taxas de transmissão adaptativas e reescalonamento de pacotes ACK para conseguir maximizar a vazão da rede. O protocolo em questão faz uso de sinais pulso e tom para coletar informações relacionadas a seus vizinhos. Tais sinais permitem indicar determinadas condições da rede sem onerá-la, visto que são perceptíveis em até  $5\mu\text{s}$  [Shih et al. 2009].

Zhang et al. propuseram o FD-MAC (*Full-Duplex MAC*) que explora as vantagens das antenas *full-duplex* de ter a capacidade de transmitir e receber sinais simultaneamente [Zhang et al. 2015]. O FD-MAC pode ser usado para lidar com diferentes tipos de comunicações (unidirecional e bidirecional) em uma rede que considera o uso de antenas *full-duplex*, conforme apresentado em [Zhang et al. 2015]. O FD-MAC é baseado no mecanismo de reserva de canal do padrão IEEE 802.11 [IEEE 2007] que requer a troca de pacotes *Request to Send* (RTS) e *Full-Duplex Clear to Send* (FCTS) para evitar colisões.

Os protocolos de acesso ao meio baseados em comunicações *full-duplex* sofrem alguns problemas também presentes nos protocolos que usam *half-duplex*, tais como os problemas de terminal exposto e terminal escondido. Em antenas *half-duplex*, o problema de terminal escondido é comumente tratado com o uso de quadros RTS/CTS. Embora esses quadros previnam o problema do terminal escondido, eles introduzem uma considerável latência à rede [Jun et al. 2003]. No entanto, a maioria das técnicas de acesso ao meio (MAC) propostas para comunicações *full-duplex* baseia-se na utilização dos quadros RTS/CTS.

A principal contribuição deste trabalho é a proposta de uma nova técnica de acesso ao meio para comunicações *full-duplex* que se chama *Full-Duplex Tone Based MAC* (FDT-MAC). Ao invés de ser baseada em quadros RTS/CTS, o FDT-MAC explora sinais

pulso/tom para tornar mais eficiente a reserva de canal quando as estações móveis estão equipadas com antenas omnidirecionais e *full-duplex*. Resultados numéricos mostram que o FDT-MAC é capaz de realizar a reserva de canal em tempo significativamente menor que o gasto com a abordagem tradicional baseada em quadros. Os resultados indicam que o FDT-MAC provê melhoria de até 156% no que diz respeito à vazão quando comparado com FD-MAC. Quando comparado com uma técnica que considera comunicações *half-duplex*, o FDT-MAC provê ganhos de vazão de até 412%. Os referidos resultados indicam que o FDT-MAC é capaz de explorar adequadamente as potenciais vantagens das antenas *full-duplex*.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta uma breve revisão sobre o modelo de antena considerado neste trabalho; A Seção 3 apresenta uma inovadora técnica de acesso ao meio que é a principal contribuição deste trabalho; A Seção 4 mostra os resultados analíticos de diversas avaliações realizadas para comparar o desempenho do FDT-MAC com abordagens tradicionais; Finalmente, a Seção 5 conclui o trabalho e aponta direções para possíveis estudos posteriores.

## 2. Modelo de Antena

Esta seção detalha as características do modelo de antena considerado neste trabalho, além de discutir algumas das principais características das antenas *full-duplex*. Neste trabalho, utiliza-se a nomenclatura HD-MAC para o protocolo de acesso ao meio (MAC) do padrão IEEE 802.11 [IEEE 2007], uma vez que este foi projetado no contexto de antenas *half-duplex*. Conforme mencionado na Seção 1, a auto-interferência ocorre quando uma antena está transmitindo e recebendo sinais simultaneamente [Zhang et al. 2015] [Tang et al. 2016] [Zhang et al. 2016]. O presente trabalho se refere ao fator de atenuação da auto-interferência como  $K$  ( $0 \leq K \leq 1$ ). Tal fator denota a probabilidade de que uma comunicação não sofra os efeitos da auto-interferência em cenários onde ocorre transmissão e recepção simultânea de sinais. Assim como diversos trabalhos da literatura, o nosso trabalho considera que o valor de  $K$  é tal que  $K \approx 1$ , uma vez que existem diversas técnicas que praticamente cancelam as perdas decorrentes da auto-interferência [Choi et al. 2010]. Além disso, assume-se que todos os quadros são transmitidos no modo omnidirecional. Ademais, considera-se que as antenas possuem capacidade de transmitir e receber sinais pulso e tom. Pulso e tom são senoides que não carregam nenhum tipo de informação. O tempo gasto para que uma antena perceba um sinal pulso/tom é de não mais que  $5\mu s$  [Shih et al. 2009]. Geralmente, estes sinais são utilizados com algum outro tipo de mecanismo para apontar alguma condição particular da rede [Guimaraes et al. 2015]. Assume-se ainda que uma antena é capaz de perceber a potência do sinal recebido e o ângulo de chegada dele com uma precisão razoável. Algumas técnicas existentes possibilitam precisão de ângulo de chegada de  $6^\circ$  para antenas omnidirecionais [Malajner et al. 2012]. Se a antena omnidirecional for considerada como um vetor de antenas direcionais em que cada elemento opera em modo omnidirecional, a precisão pode chegar a  $1^\circ$  [Giorgetti et al. 2009]. No que diz respeito à precisão da medida da potência do sinal recebido, ela é apontada como sendo de até 0.1dB [Amiri Sani et al. 2010]. O modelo de propagação considerado é o *Two-ray ground model* que é comumente utilizado na literatura [Liberti and Rappaport 1999]. Terminada a explicação sobre as considerações relacionadas ao modelo de antena, será apresentada a técnica de acesso ao meio para antenas *full-duplex* proposta neste trabalho.

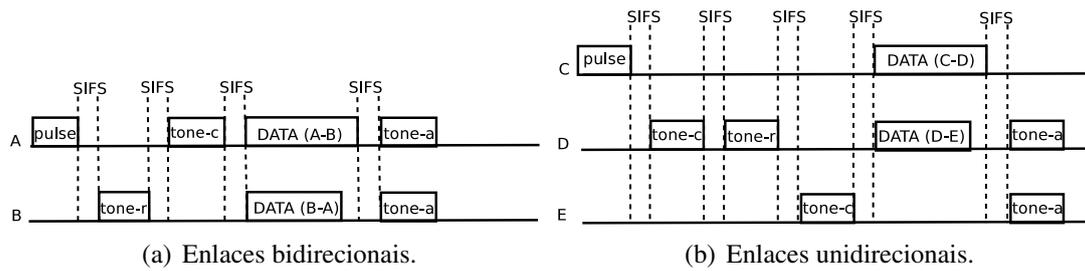
### 3. Controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex*

Este trabalho propõe uma técnica de controle de acesso ao meio (FDT-MAC) para comunicações com antenas *full-duplex* baseada na utilização de sinais pulso e tom. O FDT-MAC considera a utilização de várias das características relacionadas à camada física de outras técnicas existentes para comunicações *full-duplex*, tais como as apresentadas em [Zhang et al. 2015] [Cheng et al. 2013]. Além disso, o FDT-MAC é capaz de lidar com alguns dos principais problemas das técnicas existentes, acarretando ganhos relativos à vazão da rede. Para atingir estes ganhos de desempenho, existem dois princípios do FDT-MAC que diferem das técnicas existentes. Os referidos princípios são os seguintes:

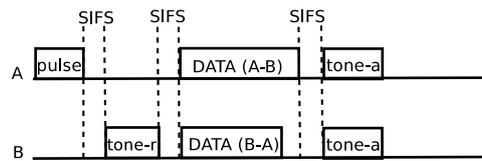
- Os quadros de controle (RTS, FCTS e ACK) são substituídos por sinais pulso e tom;
- Em uma comunicação bidirecional, o nó  $A$  envia o tom ao nó  $B$ , se e somente se, isso é necessário para a atualização do NAV. Quando este tom não é enviado por não ser necessário, denomina-se este comportamento de **supressão de tom**.

Estes princípios tem por objetivo melhorar a vazão da rede ao reduzir o tempo dispendido com a reserva de canal em comunicações realizadas usando antenas *full-duplex*. O primeiro princípio efetivamente reduz este tempo, visto que os sinais pulso e tom podem ser transmitidos em menos tempo que os quadros (RTS, FCTS e ACK) como será mostrado posteriormente na Seção 4. Entretanto, ao contrário do que ocorre com os quadros, os sinais pulso e tom não possuem cabeçalho com informações de controle de acesso ao meio (MAC – *Medium Access Control*). Então, é necessário desenvolver uma forma de codificar nos sinais pulso e tom as principais informações contidas no cabeçalho MAC (origem, destino e duração). Essa codificação é fundamental para a operação do FDT-MAC e será posteriormente detalhada. Exemplos de comunicação com o FDT-MAC tanto para enlaces unidirecionais quanto para bidirecionais estão ilustrados na Figura 1.

A Figura 1(a) mostra um exemplo de comunicação sobre um enlace bidirecional. Neste caso, considera-se que o nó  $A$  possui pacotes de dados para enviar ao nó  $B$  que por sua vez possui pacotes a serem enviados de volta ao nó  $A$ . Primeiramente, o nó  $A$  espera até que seu contador de recuo binário atinja zero, de modo similar ao proposto no padrão IEEE 802.11. Se a antena não estiver bloqueada, então o nó  $A$  transmite um sinal “pulso” (*pulse*) ao nó  $B$ . O nó  $B$  ao receber o pulso “percebe” que o sinal é direcionado a ele e que veio do nó  $A$ . Então, o nó  $B$  responde com um sinal “tom resposta” (*tone-r*) ao nó  $A$ . O “campo” duração do sinal *tone-r* é definido como sendo igual ao máximo valor dentre o recebido no pulso ( $T_{DATA(A,B)}$ ) e o calculado a partir do pacote de dados que o nó  $B$  tem para enviar ao nó  $A$  ( $T_{DATA(B,A)}$ ). Assim, a duração é definida como  $\max(T_{DATA(A,B)}, T_{DATA(B,A)})$ . De modo análogo, o nó  $A$  “confirma” que o sinal *tone-r* recebido é destinado a ele e que veio de  $B$ . Logo, o nó  $A$  responde ao nó  $B$  um “tom de confirmação” (*tone-c*) com o “campo” duração sendo o valor máximo entre o recebido no *tone-r* ( $T_{DATA(B,A)}$ ) e o contido no *pulse* anteriormente enviado ( $T_{DATA(A,B)}$ ). Os nós vizinhos que escutarem os sinais *pulse*, *tone-r* e *tone-c* estarão cientes da comunicação em curso entre os nós  $A$  e  $B$  sendo capazes de estabelecer seu NAV apropriadamente para prevenir colisões. Tendo sido concluída a reserva do canal, os nós  $A$  e  $B$  começarão a trocar pacotes de dados e sinais de “tom ACK” (*tone-a*), ao invés do pacote ACK tradicional. A Figura 1(b) apresenta um exemplo de comunicação sobre um enlace unidirecional onde o nó  $C$  possui pacote de dados para enviar ao nó  $D$  enquanto o nó  $D$  por sua vez possui



**Figura 1. Exemplo de uma comunicação usando FDT-MAC.**



**Figura 2. Exemplo da supressão de tom no FDT-MAC.**

pacotes de dados para o nó  $E$ . Então, o nó  $C$  envia um pulso para  $D$ . Neste momento, o nó  $D$  precisa responder a  $C$  confirmando o recebimento do pulso e também iniciar uma comunicação com  $E$ . Todavia, um sinal tom não pode ser “percebido” como sendo simultaneamente destinado aos nós  $C$  e  $E$  o que força o nó  $D$  a enviar primeiro um sinal  $tone-c$  ao nó  $C$  e depois enviar um sinal  $tone-r$  ao nó  $E$ . O nó  $C$  então recebe o  $tone-c$  e espera até que o nó  $D$  estabeleça a comunicação com o nó  $E$ , enquanto o nó  $E$  responde ao nó  $D$  com um sinal  $tone-c$ . Finalmente, os nós  $C$ ,  $D$  e  $E$  trocam pacotes de dados e sinais  $tone-a$  prosseguindo normalmente sua comunicação. Para os enlaces unidirecionais, o campo “duração” dos sinais  $pulse$ ,  $tone-r$  e  $tone-c$  é preenchido da mesma forma que fora explicado para os enlaces bidirecionais. Novamente, o NAV é apropriadamente estabelecido pelos nós vizinhos que escutam os referidos sinais, de modo a prevenir colisões.

O segundo princípio do FDT-MAC tem por objetivo evitar o envio desnecessário de um sinal tom. Suponha que  $T_{DATA(i,j)}$  denota o tempo gasto para enviar o pacote de  $i$  para  $j$  considerando o tamanho de seu pacote de dados e todas as etapas de reserva de canal. Portanto, se  $T_{DATA(A,B)} \geq T_{DATA(B,A)}$ , note que o  $tone-c$  enviado de  $A$  para  $B$  confirmando o campo “duração” como sendo  $\max(T_{DATA(A,B)}, T_{DATA(B,A)})$  é desnecessário, uma vez que nesse caso  $\max(T_{DATA(A,B)}, T_{DATA(B,A)}) = T_{DATA(A,B)}$ . Ou seja, os vizinhos do nó  $A$  já conheciam esse valor de campo “duração” e tinham o usado para atualizar seu NAV corretamente ao terem escutado o sinal  $pulse$  proveniente de  $A$  no início da comunicação. Então, neste caso o  $tone-c$  enviado de  $A$  para  $B$  é suprimido. Assim, ao invés de transmitir  $tone-c$ , o nó  $A$  inicia o envio dos quadros de dados conforme ilustrado na Figura 2. É importante mencionar que a supressão de tom economiza ainda um período de SIFS (*Short Interframe Space*) do tempo total da comunicação, melhorando assim a vazão total da rede como será discutido na Seção 4.

### 3.1. Codificando duração, origem e destino para os sinais

A codificação das principais informações contidas no cabeçalho da camada MAC nos sinais pulso e tom possui um papel importante no funcionamento do FDT-MAC. Há três principais informações a serem codificadas: origem do sinal, destino do sinal e duração

da comunicação. A duração da comunicação é codificada na duração do tempo de transmissão dos sinais pulso e tom ( $T_p$ ). Então, para o FDT-MAC,  $T_p = T_{sync} + \lceil \log_2 P_{sz} \rceil$ , onde  $P_{sz}$  representa o tamanho do pacote de dados em bytes e  $T_{sync}$  denota o tempo necessário de sincronização. Conforme discutido na Seção 2, os sinais pulso e tom podem ser percebidos em até  $5\mu s$  [Shih et al. 2009]. Portanto, considera-se que  $T_{sync}$  é igual a  $5\mu s$ . Note que a informação de duração codificada em  $T_p$  é a mesma para quaisquer dos sinais usados pelo FDT-MAC (*pulse*, *tone-r*, *tone-c*, *tone-a*). Estes sinais podem ser diferenciados entre eles por frequência, fase ou amplitude [Liberti and Rappaport 1999]. Logo, ao receber um sinal com duração  $T_p$ , um nó é capaz de prever a duração da comunicação que é análoga ao campo “duração” existente na camada MAC nos quadros de controle.

A origem e destino do sinal são identificadas com base em uma tabela que armazena a combinação da potência do sinal recebido (RSSI – *Received Signal Strength Indicator*) e do ângulo de chegada (AOA – *Angle of Arrival*). Como uma antena é capaz de ajustar a potência de transmissão de acordo com o nó vizinho, um nó percebe que um sinal não é direcionado a ele quando o RSSI é maior que um limiar esperado [Mao et al. 2007]. A referida tabela pode ser montada a partir das mensagens de *broadcast* usadas pelos protocolos de roteamento e controle de acesso ao meio, visto que estas mensagens são utilizadas periodicamente em comunicações sem fio [Mohapatra and Krishnamurthy 2005]. Estas mensagens em *broadcast* identificam os nós origem e destino explicitamente nos cabeçalhos da camada MAC e possibilitam que cada nó armazene informações relativas à combinação potência do sinal recebido e ângulo de chegada de cada vizinho o que torna viável a montagem apropriada da tabela previamente referida. Como pode ser inferido, a codificação da origem e destino do sinal não deve levar a erros na identificação, isto é, a identificação tem que ser muito precisa para que o FDT-MAC seja viável. A seguir, será apresentada uma análise probabilística acerca da precisão desta identificação.

### 3.2. Análise probabilística da precisão da identificação

Considere as notações presentes na Tabela 1. Baseado em uma análise similar que se baseia em corresponder as medidas possíveis de potência do sinal recebido e ângulo de chegada com o problema do aniversário (*Birthday Problem*), um cálculo de  $P_f$  foi feito em função das variáveis  $\epsilon$  e  $\tau$ . No que concerne ao  $\epsilon$ , há estudos que indicam a possibilidade de atingir uma precisão de até  $6^\circ$  para o ângulo de chegada em antenas omnidirecionais [Malajner et al. 2012]. Além disso, a precisão da potência do sinal recebido pode atingir 0.1dB como relatado por [Amiri Sani et al. 2010]. Assim, assumindo estes valores ( $\epsilon = 6$ ,  $\tau = 0.1$ ), bem como que as características da rede e da antena tem os valores apresentados na Tabela 2,  $P_f$  foi calculado e apresentou um valor menor que  $3 \cdot 10^{-3}$ . Vale ressaltar que na Tabela 2, onde há o valor “–” na tabela, significa que aquela variável não se aplica ao elemento da rede denotado na coluna correspondente. Ademais, considerando que o FDT-MAC pode operar sobre um vetor de antenas direcionais onde cada elemento do vetor funciona em modo omnidirecional, a precisão do ângulo de chegada alcança  $1^\circ$  [Giorgetti et al. 2009]. Neste caso, ( $\epsilon = 1$ ,  $\tau = 0.1$ ), o valor de  $P_f$  é menor que  $5 \cdot 10^{-4}$ . Portanto, os resultados apresentados mostram que a acurácia da identificação da origem e destino dos sinais possui uma probabilidade desprezível de erro o que torna o FDT-MAC viável. Em seguida, serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho que avaliam o impacto do uso do FDT-MAC.

**Tabela 1. Notações.**

$\Delta(G)$	Grau máximo do grafo $G$ (topologia da rede).
$\epsilon$	Precisão da medida de ângulo de chegada do sinal ( $^\circ$ ).
$\tau$	Precisão da medida de potência do sinal recebido (dB).
$g(x)$	Ganho de antena do nó $x$ .
$G$	Grafo que representa a topologia da rede.
$h(x)$	Altura da antena.
$lo(x)$	Perda de sistema do nó $x$ .
$P_{sz}$	Tamanho do pacote de dados (bytes).
$P_f$	Probabilidade de erro de previsão.
$pow(x)$	Potência de transmissão do nó $x$ .
$R_c$	Taxa de transmissão de dados do canal (Mbps).
$R_{Max}$	Máxima potência do sinal.
$R_{Min}$	Magnitude mínima de sinal detectável pela antena (dB).
$sh_{med}$	<i>Shadowing</i> médio do meio de propagação.
$T_{slot}$	Tempo de duração da fatia de tempo ( $\mu s$ ).
$T_{ACK}$	Tempo de transmissão do ACK ( $\mu s$ ).
$T_{CT}$	Tempo de transmissão do CTS ( $\mu s$ ).
$T_{DATA}$	Tempo de transmissão do pacote de dados ( $\mu s$ ).
$T_p$	Tempo de transmissão do pulso e do tom ( $\mu s$ ).
$T_{RT}$	Tempo de transmissão do RTS ( $\mu s$ ).
$w$	Razão entre a velocidade de propagação do meio e a velocidade da luz.

**Tabela 2. Parâmetros usados para cálculo de  $P_f$ .**

Parâmetro	Transmissor	Receptor	Meio	Rede
$pow$	15 dBm	15 dBm	–	–
$g$	0 dB	0 dB	–	–
$lo$	1,4691 dB	1,4691 dB	–	–
$h$	1,5 m	1,5 m	–	–
$R_{min}$	–94 dBm	–94 dBm	–	–
$R_{max}$	0 dBm	0 dBm	–	–
$sh_{med}$	–	–	4 dB	–
$w$	–	–	0,125	–
$\Delta(G)$	–	–	–	5

## 4. Resultados

Esta seção apresenta as avaliações realizadas neste trabalho. Essas avaliações mostram o impacto positivo decorrente da utilização do esquema proposto. Para realizar essa tarefa, a avaliação apresentada baseia-se em métricas bastante referenciadas na literatura. Inicialmente, será apresentada uma estimativa de cota superior para a vazão considerando um cenário sem colisões. Este cálculo da vazão máxima é utilizado na literatura para comparar técnicas de controle de acesso ao meio [Sakano et al. 2013] [Liu et al. 2012] [Jun et al. 2003].

Embora a vazão máxima provenha uma cota superior para as técnicas avaliadas, ela não leva em consideração o impacto gerado pelo crescimento da janela do recuo binário no desempenho da rede. Para se obter uma estimativa mais precisa da vazão sob condições de tráfego intenso, muitos modelos foram propostos na literatura, tais como os apresentados em [Bianchi 2000] [Tinnirello et al. 2010]. Estes modelos consideram que a rede está saturada, ou seja, que cada nó sempre possui pacotes a transmitir, o que vai fatalmente levar a colisões e ao aumento da janela do recuo binário. Neste trabalho, quando esta condição de saturação é considerada, denota-se a vazão como vazão de saturação. É importante mencionar que o modelo de Bianchi é utilizado como ferramenta de avaliação de várias técnicas de controle de acesso ao meio [Sagari et al. 2015] [Nayak et al. 2017]. Portanto, o modelo de Bianchi será usado para realizar avaliações do desempenho da rede

em condições de saturação. Conforme apresentado posteriormente, com algumas pequenas modificações, o modelo em questão é capaz de avaliar tanto técnicas projetadas para comunicações *half-duplex* quanto para comunicações *full-duplex*.

O presente trabalho apresentará uma avaliação do FDT-MAC nos dois contextos supracitados, isto é, tanto em ambientes livres de colisão quanto em ambientes saturados. Para essas avaliações serão usadas a vazão máxima e a vazão de saturação propostas em [Jun et al. 2003] e [Bianchi 2000], respectivamente. Vale ressaltar que o aumento da vazão máxima e da vazão de saturação implicam diretamente na redução do atraso fim-a-fim e na redução da latência da rede. No entanto, estas métricas não serão diretamente avaliadas neste artigo por limitações de espaço. Nas comparações em questão, o FDT-MAC será terá seus resultados contrapostos com uma técnica projetada para comunicações *full-duplex* (FD-MAC) e com o padrão usado nas comunicações *half-duplex* (HD-MAC). Assim, será mostrado que o FDT-MAC possui melhor desempenho que o FD-MAC e também que consegue aproveitar bem o potencial teórico das comunicações *full-duplex*, visto que possui em quase todos os casos avaliados desempenho mais de 100% superior ao HD-MAC. Além disso, será apresentada uma discussão do impacto da supressão de tom na vazão máxima. É importante mencionar que o atraso de propagação das transmissões foi considerado como desprezível para todas as análises apresentadas. Além disso, a supressão de tom foi considerada como estando habilitada apenas quando expressamente mencionada.

#### 4.1. Vazão Máxima

A seguir, será apresentado o cálculo da vazão máxima ( $S_{max}$ ). Este cálculo foi feito baseado na seguinte definição [Jun et al. 2003]:

$$S_{max} = \frac{8 \cdot P_{sz}}{T_t}, \quad (1)$$

onde  $P_{sz}$  denota o tamanho do pacote de dados e  $T_t$  denota o tempo total de transmissão. Além disso,  $T_t$  possui diferentes definições para HD-MAC, FD-MAC e FDT-MAC:

$$T_t = \begin{cases} L, & \text{para HD-MAC,} \\ L + T_{CT} + T_{SF}, & \text{para FD-MAC,} \\ L_{tone}, & \text{para FDT-MAC,} \end{cases} \quad (2)$$

onde

$$\begin{aligned} L &= T_{RT} + T_{CT} + T_{DATA} + T_{ACK} + T_B + T_{DF} + 3 \cdot T_{SF}, \\ L_{tone} &= 9/2 \cdot T_p + T_{DATA} + T_B + T_{DF} + 9/2 \cdot T_{SF}. \end{aligned}$$

Com base na Equação (1), o  $S_{max}$  foi calculado para HD-MAC, FD-MAC e FDT-MAC. Nos cálculos, foi considerado que as comunicações sobre enlaces bidirecionais e unidirecionais (ilustradas na Figura 1) são equiprováveis. Foi considerado também que todas as comunicações possuem o mesmo tamanho de pacote de dados. Além disso, o cálculo foi feito levando em conta os parâmetros dos padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11b [IEEE 2007].

**Tabela 3. Vazão máxima para diversos protocolos.**

Técnica	$R_c$ (Mbps)	$P_{sz}$ (bytes)	FDT-MAC	HD-MAC	FD-MAC		
			$S_{max}$ (Mbps)	$S_{max}$ (Mbps)	Ganho (%)	$S_{max}$ (Mbps)	Ganho (%)
DSSS	1	256	1,38	0,53	159,59	0,98	40,35
		512	1,63	0,69	135,29	1,32	23,90
		1024	1,80	0,82	119,44	1,59	13,16
	2	256	2,25	0,82	175,82	1,48	52,09
		512	2,88	1,16	148,52	2,16	33,33
		1024	3,35	1,47	128,21	2,81	19,38
HR	11	256	4,68	1,46	<b>220,62</b>	2,54	<b>84,54</b>
		512	7,72	2,58	199,44	4,55	69,71
		1024	11,43	4,18	173,61	7,54	51,60
OFDM	6	256	6,36	2,92	117,86	5,38	18,24
		512	8,33	3,93	111,69	7,44	11,94
		1024	9,82	4,75	106,89	9,18	7,04
	12	256	9,05	4,40	105,74	7,98	13,48
		512	13,12	6,43	104,16	11,95	9,77
		1024	16,99	8,38	102,70	15,98	6,32
	54	256	13,43	7,17	87,21	12,58	6,72
		512	23,74	12,58	88,70	22,41	5,94
		1024	38,92	20,40	90,74	37,11	4,87

A Tabela 3 mostra os resultados da comparação de  $S_{max}$  do FDT-MAC com o obtido quando se considera HD-MAC e FD-MAC para diferentes valores de tamanho de pacote de dados e taxa de transmissão do canal. Observando a Tabela 3, nota-se que o FDT-MAC pode prover significativa melhoria de vazão de até 220,62% quando comparado com HD-MAC e de até 84,54% quando comparado com o FD-MAC. Verifica-se ainda que o FDT-MAC obteve melhor resultado que o FD-MAC em todos os cenários avaliados, uma vez que  $L_{tone} \leq L + T_{CT} + T_{SF}$  vale para todos os casos avaliados. O ganho do FDT-MAC é maior quando a latência da reserva de canal constitui uma maior porção do tempo total de transmissão, pois  $T_{DATA}$  não difere entre FD-MAC e FDT-MAC. É também notável que o FDT-MAC supera o HD-MAC em mais de 100% na maioria dos casos. Isso significa que o FDT-MAC consegue explorar a vantagem teórica do uso de antenas *full-duplex*, visto que espera-se que antenas deste tipo provenham vazão duas vezes maior que quando utiliza-se antenas *half-duplex*.

#### 4.2. Vazão de saturação

A vazão de saturação mede a máxima vazão que o canal pode suportar sob condições estáveis de tráfego intenso [Bianchi 2000]. Para avaliar a vazão de saturação, nosso trabalho utiliza o modelo de Bianchi apresentado em [Bianchi 2000]. Este modelo foi projetado e muito utilizado para avaliação de técnicas de controle acesso ao meio (MAC) em termos de vazão em comunicações baseadas em antenas *half-duplex*. Entretanto, este modelo também é apropriado para técnicas MAC que se baseiam em antenas *full-duplex*, pois o modelo se baseia no fato de que uma transmissão tem sucesso se somente um dos contadores de recuo binário dos nós atingir zero em um dado instante de tempo. Como esta condição é também válida para antenas *full-duplex*, o modelo em questão é viável para avaliar técnicas MAC que operam com antenas dos dois tipos, conforme é feito nos trabalhos [Zhang et al. 2015] [Cheng et al. 2013].

A definição matemática da vazão de saturação segundo modelo de Bianchi é [Bianchi 2000]:

$$S = (p_s \cdot p_{tr} \cdot P_{sz}) / T_{slotavg}, \quad (3)$$

**Tabela 4. Parâmetros usados na avaliação da vazão de saturação.**

$R_c$ (para todas transmissões)	1 Mbps
$P_{sz}^{ij} (\forall i, j)$	8184 bits
$T_{DF}$	128 $\mu s$
$T_{SF}$	28 $\mu s$
$K$	1

onde

$$T_{slotavg} = T_{slot} \cdot (1 - p_{tr}) + p_{tr} \cdot p_s \cdot T_s + p_{tr} \cdot (1 - p_s) \cdot T_c,$$

$$T_s = T_t - T_B,$$

$$T_c = T_{RT} + T_{DF},$$

e  $p_{tr}$  denota a probabilidade de pelo menos uma transmissão ocorrer durante uma fatia de tempo, enquanto  $p_s$  denota a probabilidade de uma transmissão ocorrendo durante uma fatia de tempo ser bem sucedida. Estas probabilidades são dependentes dos parâmetros do algoritmo de recuo binário exponencial (tamanhos mínimo e máximo da janela de recuo binário) e da quantidade de nós da rede. Para maiores detalhes no que tange ao cálculo destas probabilidades, pode-se recorrer ao trabalho [Bianchi 2000] e suas referências.

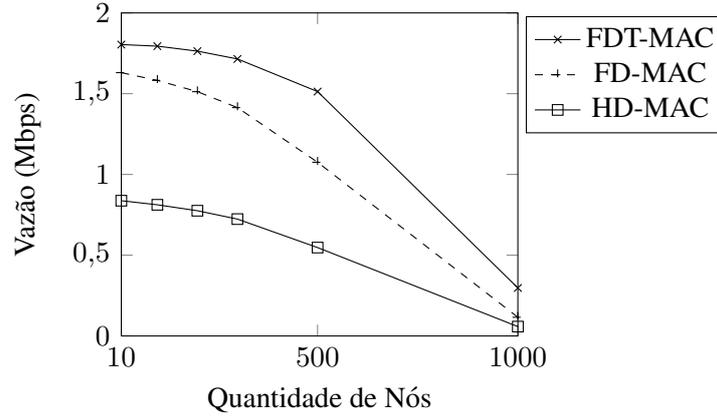
Apenas uma mudança na Equação (3) é necessária para englobar também o caso em que ocorre comunicações com antenas *full-duplex*. Quando uma comunicação tem sucesso, o tamanho total de dados transmitidos ( $S$ ) deve ser a soma do tamanho dos pacotes das duas comunicações em andamento. Essa mudança se deve ao fato de que podem haver dados sendo transmitidos de  $A$  para  $B$  e de  $B$  para  $A$  em uma mesma comunicação, como ilustrado na Figura 1(a). Portanto, para todos os resultados apresentados neste trabalho a vazão de saturação é considerado como:

$$S = (p_s \cdot p_{tr} \cdot P_{szexp}) / T_{slotavg}, \quad (4)$$

$$P_{szexp} = P_{sz}^{ab} + P_{sz}^{ba}, \quad (5)$$

onde  $P_{sz}^{ij}$  denota o tamanho do pacote de dados provenientes do nó  $i$  para o nó  $j$ . Relembre que o FDT-MAC usa sinais pulso e tom ao invés de quadros RTS/CTS. Logo,  $T_c = T_{pulse} + T_{DF}$  para o FDT-MAC.

A partir das Equações (4) e (5), calculou-se a vazão de saturação para diversas quantidades de nós utilizando as técnicas HD-MAC, FD-MAC e FDT-MAC. Para este cálculo, os parâmetros utilizados foram os disponíveis na Tabela 4, uma vez que são os mesmos parâmetros usados em [Zhang et al. 2015] [Cheng et al. 2013]. O tamanho dos cabeçalhos das camadas MAC e física bem como os parâmetros da janela de *backoff* são os mesmos definidos no padrão IEEE 802.11b. A comparação do FDT-MAC com o FD-MAC e HD-MAC se encontra ilustrada na Figura 3. Observa-se que o FDT-MAC supera o FD-MAC e o HD-MAC em até 156% e 412%, respectivamente. Note que o ganho do FDT-MAC aumenta à medida que o número de nós aumenta, pois o FDT-MAC possui uma latência menor sendo capaz de lidar melhor do que o FD-MAC e o HD-MAC com ambientes saturados. O FDT-MAC aproveita a vantagem do uso de antenas *full-duplex*, visto que supera o HD-MAC em mais de 100% em todos os casos avaliados. Note que nessa avaliação considerou-se que  $P_{sz} = 8184$  bits e  $R_c = 1$  Mbps, ou seja,  $T_{DATA}$  constitui grande parte do tempo total de transmissão. Se um tamanho de pacote menor



**Figura 3. Comparação da vazão de saturação para várias técnicas.**

e/ou uma taxa de transmissão maior fossem considerados, o ganho do FDT-MAC seria ainda maior, pois neste caso a latência da reserva de canal teria um impacto ainda maior sobre a vazão. Avaliou-se também o impacto da auto-interferência em comunicações usando antenas *full-duplex* para diferentes valores do fator de auto-interferência ( $K$ ) com algumas mudanças na Equação (4). Devido à falta de espaço, essas modificações não serão apresentadas. Os resultados indicaram que quando  $K$  diminui, a vazão de saturação do FDT-MAC e do FD-MAC diminuem drasticamente. Entretanto, quando  $K$  diminui, o ganho do FDT-MAC sobre o FD-MAC chega a 236% (cenário com 1000 nós e  $K = 0,75$ ), confirmando o impacto positivo do FDT-MAC sobre comunicações usando antenas *full-duplex*.

### 4.3. Supressão de Tom

Conforme explicado na Seção 3, o FDT-MAC realiza a supressão do tom em algumas situações em que este tom extra é desnecessário. Para avaliar o impacto da supressão de tom, as seguintes variações de tamanho de pacote de dados foram avaliadas em termos de vazão máxima ( $S_{max}$ ):

- I)  $P_{sz}^{AB} = P_{sz}^{BA} = 256$  bits;
- II)  $P_{sz}^{AB} = 512$  bits,  $P_{sz}^{BA} = 256$  bits;
- III)  $P_{sz}^{AB} = 1024$  bits,  $P_{sz}^{BA} = 512$  bits.

Foi considerado ainda que todos os enlaces são bidirecionais. Devido a este comportamento e assumindo que para todas as comunicações dos cenários listados acima a supressão de tom acontece, a equação que descreve o  $L_{tone}$  foi modificada para o FDT-MAC. Uma vez que o *tone-c* enviado do nó  $A$  é suprimido (Figura 2), o  $L_{tone}$  é definido como:

$$L_{tone} = 3 \cdot T_p + T_{DATA} + T_B + T_{DF} + 3 \cdot T_{SF}. \quad (6)$$

Logo,  $S_{max}$  foi calculado com o auxílio das Equações (1) e (6). Os resultados destes cálculos estão exibidos na Tabela 5. Os resultados apontam uma vazão maior para o FDT-MAC em todos os casos. O ganho de vazão é de pelo menos 9% chegando a ser de até 93% nos cenários avaliados. Note que os resultados do FDT-MAC para o cenário

**Tabela 5. Vazão máxima com supressão de tom.**

Técnica	$R_c$ (Mbps)	Cenário	FDT-MAC	FD-MAC	Ganho (%)
			$S_{max}$ (Mbps)	$S_{max}$ (Mbps)	
DSSS	1	I	1,39	0,98	41,99
		II	1,23	0,99	24,75
		III	1,35	1,19	13,59
	2	I	2,30	1,48	55,24
		II	2,19	1,62	35,09
		III	2,53	2,10	20,29
HR	11	I	4,90	2,54	<b>93,04</b>
		II	6,01	3,41	76,10
		III	8,81	5,66	55,78
OFDM	6	I	6,82	5,38	26,81
		II	6,53	5,58	17,12
		III	7,56	6,88	9,91
	12	I	10,08	7,98	26,32
		II	10,62	8,96	18,50
		III	13,38	11,98	11,65
	54	I	15,91	12,58	26,41
		II	20,65	16,81	22,86
		III	32,90	27,83	18,21

**Tabela 6. Impacto da supressão de tom.**

Técnica	$R_c$ (Mbps)	Supressão de Tom		Ganho (%)
		$S_{max}$ (Mbps)	$S_{max}$ (Mbps)	
DSSS	1	1,39	1,38	0,72
	2	2,30	2,25	2,22
HR	11	4,90	4,68	4,70
OFDM	6	6,82	6,36	7,23
	12	10,08	9,05	11,38
	54	15,91	13,43	<b>18,47</b>

I ( $P_{sz}^{AB} = P_{sz}^{BA} = 256$  bits) podem ser comparados ao  $S_{max}$  calculado sem considerar a supressão de tom (Tabela 3). Esta comparação é apresentada na Tabela 6 comparando o FDT-MAC com supressão de tom com o FDT-MAC sem ela. Observando a Tabela 6, infere-se que a utilização da supressão de tom no FDT-MAC aumenta sua vazão em até 18%. Além disso, é notável que para OFDM (usada pelo padrão IEEE 802.11a) o impacto da supressão de tom é significativamente maior. Portanto, conclui-se que a supressão de tom possui um papel importante no FDT-MAC, uma vez que esta permite uma reserva de canal mais rápida em algumas situações, conforme descrito na Seção 3. Essa avaliação conclui a análise do FDT-MAC apresentada neste trabalho. A referida análise mostrou que o FDT-MAC possui um impacto significativamente positivo sobre a vazão da rede, uma vez que o FDT-MAC consegue completar uma comunicação gastando menos tempo que as outras técnicas existentes com uma probabilidade desprezível de erro.

## 5. Conclusão

No que tange a 5G em redes móveis, o uso de antenas de *full-duplex* tem sido considerado como uma alternativa promissora para aumento da vazão. Neste contexto, este trabalho propôs uma técnica de acesso ao meio (FDT-MAC) que consegue realizar uma comunicação em tempo inferior ao dispendido pelas demais técnicas existentes. O ganho de vazão decorrente do uso do FDT-MAC foi mensurado como sendo de até 156% e 412% quando comparado com o FD-MAC e o HD-MAC, respectivamente. Como trabalhos futuros, seria interessante avaliar uma definição mais flexível do tempo de duração da transmissão dos dados ( $T_{DATA}$ ), ao invés de sempre considerar

que  $T_{DATA} = \max(T_{DATA(A,B)}, T_{DATA(B,A)})$ . Em situações em que um dos dois tempos envolvidos no cálculo seja muito maior que o outro, pode ser interessante a divisão deste tempo maior em mais de uma comunicação para evitar uma longa espera do nó que possui o menor tempo. Nesses casos, utilizando uma política apropriada de agendamento de comunicações, espera-se conseguir uma melhoria na vazão total da rede, uma vez que as comunicações melhor organizadas evitariam longos ciclos ociosos nos nós da rede.

## Referências

- Amiri Sani, A., Zhong, L., and Sabharwal, A. (2010). Directional antenna diversity for mobile devices: characterizations and solutions. In *Proc. of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 221–232, Chicago, USA. ACM.
- Bianchi, G. (2000). Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 18(3):535–547.
- Cheng, W., Zhang, X., and Zhang, H. (2013). RTS/FCTS mechanism based full-duplex MAC protocol for wireless networks. In *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2013 IEEE*, pages 5017–5022. IEEE.
- Choi, J. I., Jain, M., Srinivasan, K., Levis, P., and Katti, S. (2010). Achieving single channel, full duplex wireless communication. In *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 1–12. ACM.
- Giorgetti, G., Maddio, S., Cidronali, A., Gupta, S., and Manes, G. (2009). Switched beam antenna design principles for angle of arrival estimation. In *Proceedings fo the European Wireless Technology Conference*, pages 5–8, Rome, Italy. IEEE.
- Guimaraes, L. D. M., Bordim, J. L., and Nakano, K. (2015). Using Pulse/Tone Signals as an Alternative to Boost Channel Reservation on Directional Communications. *IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 98(8):1647–1656.
- IEEE (2007). IEEE Standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks - specific requirements - part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. IEEE Standard 802.11, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Jun, J., Peddabachagari, P., and Sichitiu, M. (2003). Theoretical maximum throughput of IEEE 802.11 and its applications. In *Proceedings of the Second IEEE International Symposium on Network Computing and Applications*, pages 249–256, Cambridge, MA, USA. IEEE.
- Kim, J. Y., Mashayekhi, O., Qu, H., Kazandjieva, M., and Levis, P. (2013). Janus: A novel MAC protocol for full duplex radio. Technical report, Stanford University.
- Liberti, J. and Rappaport, T. (1999). *Smart antennas for wireless communications*. Prentice Hall PTR.
- Liu, W., Nishiyama, H., Kato, N., Shimizu, Y., and Kumagai, T. (2012). A novel gateway selection method to maximize the system throughput of wireless mesh network

- deployed in disaster areas. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2012 IEEE 23rd International Symposium on*, pages 771–776. IEEE.
- Malajner, M., Planinsic, P., and Gleich, D. (2012). Angle of arrival estimation using RSSI and omnidirectional rotatable antennas. *IEEE Sensors Journal*, 12(6):1950–1957.
- Mao, G., Anderson, B. D. O., and Fidan, B. (2007). Path loss exponent estimation for wireless sensor network localization. *Computer Networks*, 51(10):2467–2483.
- Mohapatra, P. and Krishnamurthy, S. (2005). *Ad Hoc Networks: technologies and protocols*. Springer.
- Murad, M. and Eltawil, A. M. (2017). A Simple Full-Duplex MAC Protocol Exploiting Asymmetric Traffic Loads in WiFi Systems. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2017 IEEE*, pages 1–6. IEEE.
- Nayak, P., Garetto, M., and Knightly, E. W. (2017). Multi-user downlink with single-user uplink can starve TCP. In *INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications, IEEE*, pages 1–9. IEEE.
- Sagari, S., Baysting, S., Saha, D., Seskar, I., Trappe, W., and Raychaudhuri, D. (2015). Coordinated dynamic spectrum management of LTE-U and Wi-Fi networks. In *Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2015 IEEE International Symposium on*, pages 209–220. IEEE.
- Sakano, T., Fadlullah, Z. M., Ngo, T., Nishiyama, H., Nakazawa, M., Adachi, F., Kato, N., Takahara, A., Kumagai, T., Kasahara, H., et al. (2013). Disaster-resilient networking: a new vision based on movable and deployable resource units. *IEEE Network*, 27(4):40–46.
- Shih, K., Liao, W., Chen, H., and Chou, C. (2009). On avoiding RTS collisions for IEEE 802.11-based wireless ad hoc networks. *Computer Communications*, 32(1):69–77.
- Tang, R., Zhao, J., Qu, H., and Zhang, Z. (2016). Energy-efficient resource allocation for 5G full-duplex enabled device-to-device communication. In *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2016 IEEE*, pages 1–7. IEEE.
- Tinnirello, I., Bianchi, G., and Xiao, Y. (2010). Refinements on IEEE 802.11 distributed coordination function modeling approaches. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(3):1055–1067.
- Wang, H., Chen, S., Xu, H., Ai, M., and Shi, Y. (2015). SoftNet: A software defined decentralized mobile network architecture toward 5G. *IEEE Network*, 29(2):16–22.
- Zhang, X., Cheng, W., and Zhang, H. (2015). Full-duplex transmission in PHY and MAC layers for 5G mobile wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 22(5):112–121.
- Zhang, Z., Long, K., Vasilakos, A. V., and Hanzo, L. (2016). Full-duplex wireless communications: challenges, solutions, and future research directions. *Proceedings of the IEEE*, 104(7):1369–1409.