

Eficiência Espectral e Atraso em Comunicação

Full-Duplex Device-to-Device Bidirecional

Rhenan Bezerra da Silva e Paulo Cardieri

Resumo— A comunicação bidirecional simultânea por meio da técnica *full-duplex* (FD) permite que o tráfego escoe mais rapidamente em um enlace, diminuindo o acesso ao canal pelo enlace, reduzindo assim a interferência em uma rede. Por outro lado, a comunicação FD causa o aumento na interferência pelo aumento do número de transmissões. Nesse trabalho, investigamos o resultado final desses dois efeitos na capacidade agregada de enlaces D2D operando em uma rede celular. Modelando o enlace D2D como dois sistemas fila+servidor, mostramos que o uso da técnica FD aumenta a eficiência espectral por unidade de área da rede, às custas de um aumento no atraso e, conseqüentemente, redução da região de estabilidade dos enlaces.

Palavras-Chave— Comunicação sem fio, *Device-to-device*, *Full-Duplex*, Geometria Estocástica.

Abstract— Simultaneous bidirectional communication through the use of the in-band full-duplex (FD) technique allows packets to flow more quickly over a link, reducing link channel access and the interference in a network. On the other hand, the FD technique leads to an intrinsic increase of interference. In this work, we investigate the net result of these two opposite effects on the aggregate capacity of D2D links operating in a cellular network. By modeling the D2D link as queues, we show that the use of the FD technique increases the area spectral efficiency, but at the expense of an increase of the delay.

Keywords— *Wireless communications*, *device-to-device*, *full-duplex*, *Stochastic Geometry*.

I. INTRODUÇÃO

Um dos desafios das novas tecnologias de comunicação sem fio é atender requisitos de qualidade de serviço cada vez mais exigentes, como altas taxas de dados e de disponibilidade de serviços e baixos atrasos. Isso tem motivado o estudo de formas mais eficientes de uso dos recursos de rádio. Nesse contexto, as técnicas de comunicação *device-to-device* (D2D) e *full-duplex* (FD) têm sido consideradas como promissoras.

A tecnologia D2D permite que usuários de uma rede celular que estejam próximos entre si se comuniquem diretamente, diminuindo, assim, o tráfego na infraestrutura celular convencional. Apesar do aumento do nível de interferência causada pela comunicação D2D, devido a uma maior quantidade de dispositivos transmitindo na rede, ganhos podem ser alcançados através de uma coordenação eficiente da interferência entre D2D e enlaces celulares, como o aumento da eficiência espectral da rede e baixo consumo de energia nos terminais.

A técnica de comunicação *in band full-duplex* (FD) permite transmissão e recepção simultâneas de mensagens no mesmo canal. O modo de comunicação FD aumenta a eficiência espectral do enlace, mas esse ganho é limitado pela interferência que

um transmissor provoca no seu próprio receptor, a chamada *auto-interferência*. Além disso, há uma aumento intrínseco da interferência na rede, devido às transmissões simultâneas.

Nesse trabalho investigamos o desempenho de uma rede sem fio composta por enlaces celulares e enlaces D2D, que compartilham o canal de *uplink* no chamado modo *underlay* de compartilhamento, causando interferência mútua. Consideramos que os enlaces D2D são capazes de operar nos modos de duplexação *half-duplex* (HD), como usual, e também no modo *in band full-duplex* (FD).

O benefício da transmissão FD em um enlace D2D pode ser melhor avaliado quando consideramos o cenário típico de comunicação, em que as mensagens chegam aleatoriamente aos dois transmissores do enlace D2D. A habilidade de transmitir e receber simultaneamente faz com que os pacotes sejam escoados rapidamente, pois agora um terminal não precisa esperar que o outro entre no modo “receptor” para transmitir sua mensagem. Assim, as filas que armazenam as mensagens tendem a ficar vazias mais frequentemente, reduzindo assim a interferência produzida por cada enlace. No entanto, essa menor chance de um transmissor causar individualmente interferência pode ser compensada pelo acréscimo no nível da interferência devido ao maior número de transmissões simultâneas, com a operação no modo FD. Nesse trabalho, investigamos o resultado *líquido* obtido com a operação *full-duplex* em enlaces D2D em uma rede celular. Essa análise requer que os enlaces D2D sejam modelados como dois sistemas fila+servidor, de forma a estimarmos a probabilidade de acesso ao canal. Essa modelagem permitirá também avaliar o efeito da comunicação FD no atraso nos enlaces D2D.

Inúmeros autores tem estudado o desempenho da comunicação D2D combinada com a técnica FD [1]–[3]. Um dos trabalhos que mais se aproxima do trabalho apresentado aqui é o de Kim et. al [3], que investigam o desempenho da comunicação bidirecional em uma rede *ad hoc* empregando transmissão FD, modelando os enlaces por meio de filas. No entanto, os autores se concentram na análise de técnicas de retransmissão. Outro trabalho próximo ao presente é o de Badri e Rasti [2], onde os autores estudam a maximização da capacidade dos enlaces D2D restrito a um atraso máximo tolerável nos enlaces celulares.

O restante do trabalho está assim estruturado: os modelos da rede e dos enlaces são apresentados na Sec. II; a Sec. III descreve o método usado para estimar a probabilidade de sucesso das transmissões D2D; uma análise do desempenho usando resultados numéricos é apresentada na Sec. IV; a Sec. V traz as conclusões.

Rhenan B. Silva (rhenanbezerra@gmail.com), Paulo Cardieri (cardieri@unicamp.br), Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas-SP,

II. MODELO DO SISTEMA

Consideramos uma rede celular com **dispositivos celulares** e **enlaces D2D**, que compartilham canais *uplink* celulares, na estratégia *underlay*, seguindo a modelagem apresentada por Shaukat et. al [1]. Os dispositivos D2D são equipados com transceptores FD, podendo operar nos modos de duplexação FD e HD. Assumimos aqui que a auto-interferência que aparece no modo FD é cancelada apenas parcialmente, restando uma fração $0 \leq \zeta \leq 1$ da potência de transmissão que vaza do transmissor para o receptor .

A. Modelo da Rede

As estações rádio-base e dispositivos celulares estão espalhados em uma região de área infinita, e suas posições são modeladas por meio dos processos pontuais de Poisson (PPP) Φ_b e Φ_c , respectivamente, de intensidade λ_b e λ_c . Assumimos que $\lambda_c > \lambda_b$, de modo que cada ERB sempre tem um dispositivo celular para servir. Cada dispositivo celular se associa à ERB mais próxima, o que resulta na distância de um enlace celular, denotada por r_c , com distribuição Rayleigh, dada por $f_{r_c}(x) = 2\pi\lambda_c x e^{-\pi\lambda_c x^2}$, $x \geq 0$ [4].

Cada enlace D2D é formado por dois transceptores, denotados genericamente por A e B , que se comunicam entre si de forma bidirecional, ou seja, nos sentidos $A \rightarrow B$ e $A \leftarrow B$. As posições dos pares também são modeladas por um PPP, denotado por Φ_{ed} , de intensidade λ_{ed} . Mais especificamente, Φ_{ed} modela as posições dos transceptores A dos enlaces D2D. O transceptor B correspondente está localizado em uma posição aleatória dentro de uma região circular de raio R centrada no transceptor A , com R sendo a distância máxima permitida de um enlace D2D. A distância de separação entre A e B , denotada por r_d , tem então distribuição [5] $f_{r_d}(x) = 2x/R^2$, $0 \leq x \leq R$.

B. Modos de Operação FD e HD dos Enlaces D2D

Assumimos que o tempo é dividido em *slots* e os enlaces D2D podem operar em dois modos com relação à duplexação do canal:

- **Modo full-duplex:** Nesse modo, os transceptores A e B podem transmitir simultaneamente, e os dois enlaces $A \rightarrow B$ e $A \leftarrow B$ são independentes. Assim, a cada *time-slot*, os transmissores (A e B) formam um processo pontual de densidade $\lambda_d = 2 \times \lambda_{ed}$.
- **Modo half-duplex:** Nesse caso, o canal não pode ser usado simultaneamente pelos transceptores A e B de um mesmo enlace D2D, e os interferentes D2D a cada *time-slot* formam um processo pontual de densidade $\lambda_d = \lambda_{ed}$.

O modo de operação afeta o comportamento dos transceptores A e B dos enlaces D2D, o que é capturado pelos modelos de filas adotadas no trabalho e apresentados na Sec. II-E.

C. Modelo do Canal de Propagação e Controle de Potência

O modelo de propagação adotado inclui a perda determinística, com expoente de perda de percurso η , e desvanecimento Rayleigh (envelope), que causa a potência de recepção seguir uma distribuição exponencial negativa. Os transmissores (D2D

ou celulares) empregam controle de potência do tipo *inversão de canal*, ou seja, a potência é ajustada para compensar a perda determinística, limitada à uma potência máxima P_u , de forma a garantir uma potência média de recepção fixa. Portanto, a potência de transmissão é uma variável aleatória, uma vez que a distância do enlace é aleatória, e vale $P_x = r_x^\eta \rho_x$, $x \in (c,d)$, em que ρ_x é a potência média de recepção desejada. Para o caso dos enlaces D2D, a distribuição de P_d é dada por [1]

$$f_{P_d}(x) = \frac{2x^{\delta-1}}{\eta\rho_d^\delta R^2}, \quad 0 \leq x \leq P_u, \quad (1)$$

em que $\delta = 2/\eta$. Note-se que $R = (P_u/\rho_d)^{\frac{1}{\eta}}$ é o máximo comprimento dos enlaces D2D, dependente da máxima potência de transmissão disponível P_u e da potência de recepção desejada ρ_d . Para o caso dos enlaces celulares, a distribuição da potência de transmissão P_c é [1]

$$f_{P_c}(x) = \frac{2\pi\lambda_c x^{\delta-1} e^{-\pi\lambda_c (\frac{x}{\rho_c})^\delta}}{\eta\rho_c^\delta \left[1 - e^{-\pi\lambda_c (\frac{P_u}{\rho_c})^\delta}\right]}, \quad 0 \leq x \leq P_u. \quad (2)$$

D. Modelos de Tráfego

Os *slots* tem duração T e os terminais celular e D2D acessam o canal usando ALOHA. Assumimos que há uma coordenação entre os dois transmissores de um enlace D2D operando no modo HD, para evitar o acesso simultâneo do canal. Para os enlaces D2D, assumimos que pacotes de duração T chegam aos dois transmissores do enlace de acordo com processos de Bernoulli, com probabilidade $a \in [0,1]$ de chegada de um pacote em um *time-slot*. Os pacotes são armazenados em uma fila de capacidade infinita até a transmissão bem sucedida, com retransmissões sem limite no número de tentativas.

Portanto, os enlaces D2D transmitem efetivamente (e causam interferência) apenas quando suas filas não estiverem vazias. Assim, a densidade efetiva de transmissores D2D é $\lambda_{d,ef} = (1 - \pi_0) \times \lambda_d$, em que π_0 é a probabilidade de a fila estar vazia. Como discutido nas próximas seções, a análise do desempenho da rede D2D requer a estimação de π_0 .

Para os enlaces celulares, assumimos tráfego em *saturação*, isto é, os terminais sempre tem pacotes para transmitir.

E. Comportamento das Filas dos Enlaces D2D

Quando os enlaces D2D operam no **modo full-duplex**, os transmissores dos transceptores A e B podem transmitir simultaneamente, de forma que os dois enlaces podem ser modelados por duas filas Geo/Geo/1 independentes entre si. Nesse caso, a probabilidade π_0 é dada por [6, Cap. 5]

$$\pi_0 = (P_{s,d} - a)/a, \quad (3)$$

e o atraso médio no sistema, medido em *time-slots*, é

$$\bar{D} = \frac{a(1-a)}{P_{s,d}(P_{s,d}-a)} + \frac{1}{P_{s,d}}, \quad (4)$$

em que $P_{s,d}$ é a probabilidade de sucesso do enlace D2D, ou probabilidade de serviço. No entanto, o nível de interferência na rede e, portanto, $P_{s,d}$, dependem do estado das filas dos

outros enlaces, isto é, do valor de π_0 . Portanto, as filas dos diversos enlaces D2D estão *acopladas* entre si, o que exigirá o uso de um método iterativo para a determinação de $P_{s,d}$ e π_0 , como descrito na Sec. III.

Por outro lado, quando os enlaces operam no **modo half-duplex**, transmissões simultâneas de A e B não são possíveis, e a transmissão de um pacote em um dos enlaces do enlace D2D dependerá do estado do outro enlace associado, de acordo com a seguinte regra: (i) se um dos enlaces não tiver pacotes para transmitir, então o outro lance poderá transmitir; (ii) caso ambos enlaces tenham pacotes para transmitir, é feito então um sorteio para a escolha do enlace que irá de fato transmitir. Note-se que agora as duas filas que modelam o enlace D2D estão *acopladas* entre si (além de estarem acopladas às filas dos outros enlaces D2D). Expressões fechadas para as probabilidades de estado filas acopladas são conhecidas apenas para casos muito simples [7], de forma que a probabilidade π_0 para o caso HD foi estimada aqui por meio de simulação, como descrito a seguir.

Simulação de um enlace D2D no modo half-duplex

Essa simulação envolve os dois enlaces unidirecionais, denotados aqui por E_A e E_B , de um enlace D2D no modo *half-duplex*, como brevemente descrito a seguir:

- 1) Pacotes são gerados nos enlaces E_A e E_B de acordo com processos de Bernoulli de média a , e armazenados de *buffers* de capacidade muito grande;
- 2) Caso um enlace não tenha pacotes em seu *buffer*, então o outro enlace está livre para transmitir;
- 3) Caso os *buffers* de ambos enlaces tenham pacotes para transmitir, então escolhe-se aleatoriamente um dos enlaces para transmitir;
- 4) A probabilidade de serviço, isto é, de sucesso de transmissão, vale $P_{s,d}$ e é igual para ambos enlaces.

No caso do modo HD é necessário usar um procedimento iterativo para estimar conjuntamente $P_{s,d}$ e π_0 , como apresentado na Sec. III.

F. Probabilidades de Sucesso

Como usual em trabalhos semelhantes, a probabilidade de sucesso de transmissão é dada por $P_{s,x} = \mathbb{P}(\text{SINR}_x \geq \theta_x)$, em que $x = c$ para o enlace celular, e $x = d$ para o enlace D2D. A relação sinal-ruído+interferência SINR_x medida em um receptor teste localizado na origem do sistema de coordenadas é definida como

$$\text{SINR}_x = \frac{\rho_x h_0}{\sigma^2 + I_{c,x} + I_{d,x} + \zeta P_x \mathbb{1}_{FD}}, \quad (5)$$

em que σ^2 é a potência do ruído térmico, $I_{c,x}$ e $I_{d,x}$ são as potências de interferência causadas pelos dispositivos celular e D2D, respectivamente, no enlace do tipo $x \in (c,d)$. Essas potências são dadas por $I_{yx} = \sum_{u_i \in \Phi_y} P_{y,i} h_i \|u_i\|^{-\eta}$, com $y \in (c,d)$, e u_i e $P_{y,i}$ são a posição e a potência de transmissão do i -ésimo interferente, respectivamente. Os termos h_0 e h_i modelam o desvanecimento Rayleigh (envoltória) do canal. O termo $\zeta P_x \mathbb{1}_{FD}$ de (5) corresponde à auto-interferência que aparece no modo FD, em que ζ é a fração residual desta auto-interferência, e $\mathbb{1}_{FD} = 1$ para $x = d$ e modo *full-duplex*

e $\mathbb{1}_{FD} = 0$ para os outros casos. Usando as propriedades da modelagem por meio de processos pontuais de Poisson, podemos mostrar¹ que [1]:

$$P_{s,x} = e^{-\frac{\theta_x \sigma^2}{\rho_x}} \mathcal{L}_{P_x} \left(\frac{\theta_x \zeta \mathbb{1}_{FD}}{\rho_x} \right) \mathcal{L}_{I_{c,x}} \left(\frac{\theta_x}{\rho_x} \right) \mathcal{L}_{I_{d,x}} \left(\frac{\theta_x}{\rho_x} \right),$$

em que a função $\mathcal{L}_X(s)$ é a transformada de Laplace da PDF da variável aleatória X . É importante notar que $\mathcal{L}_{P_x}(0) = 1$ para $\mathbb{1}_{FD} = 0$.

Para a rede considerada nesse estudo, as transformadas $\mathcal{L}_{I_{c,c}}$, $\mathcal{L}_{I_{d,d}}$, e $\mathcal{L}_{I_{c,d}}$ são dadas por [1]:

$$\mathcal{L}_{I_{c,c}}(s) = \exp \left[-\frac{s \mathbb{E}[P_c^\delta] {}_2F_1(1, 1 - \delta; 2 - \delta; -s\rho_c)}{(2\pi\lambda_b)^{-1} \rho_c^{\delta-1} (\eta - 2)} \right]$$

$$\mathcal{L}_{I_{d,d}}(s) = \mathcal{L}_{I_{d,c}}(s) = \exp \left[-\pi\kappa(1 - \pi_0) \lambda_d s^\delta \mathbb{E}[P_d^\delta] \right]$$

$$\mathcal{L}_{I_{c,d}}(s) = \exp \left(-\pi\kappa\lambda_b s^\delta \mathbb{E}[P_c^\delta] \right),$$

em que ${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot; \cdot)$ é a função hipergeométrica ordinária e $\kappa = \Gamma(1 + \delta) \Gamma(1 - \delta)$, em que $\Gamma(\cdot)$ é a função gama. Note-se que as expressões de $\mathcal{L}_{I_{d,d}}(s)$ e $\mathcal{L}_{I_{d,c}}(s)$ envolvem a densidade efetiva de transmissores D2D $\lambda_{ef} = (1 - \pi_0)\lambda_d$.

Na análise numérica apresentada na Sec. IV, consideramos $\eta = 4$, o que simplifica a expressão de $\mathcal{L}_{I_{c,c}}$ para [1]

$$\mathcal{L}_{I_{c,c}}(s) \stackrel{\eta=4}{=} \exp \left[-\pi\lambda_b \sqrt{s} \mathbb{E}[\sqrt{P_c}] \arctan(\sqrt{s\rho_c}) \right],$$

além de ser um caso típico de ambientes urbanos.

O δ -ésimo momento de P_d e P_d , presente nas expressões das transformadas de Laplace, pode ser obtido a partir das densidades (1) e (2) das potências de transmissão com controle de potência, resultando em

$$\mathbb{E}[P_d^\delta] = \frac{P_u^{2\delta}}{2R^2 \eta \rho_d^\delta} \quad \text{e} \quad \mathbb{E}[P_c^\delta] = \frac{\rho_c^\delta \gamma \left(2, \pi\lambda \left(\frac{P_u}{\rho_c} \right)^\delta \right)}{\pi\lambda \left[1 - e^{-\pi\lambda \left(\frac{P_u}{\rho_c} \right)^\delta} \right]},$$

em que $\gamma(\cdot, \cdot)$ é a função Gama Incompleta.

Para a rede considerada nesse estudo, com comunicação *full-duplex*, as probabilidades de sucesso dos enlaces D2D $P_{s,d}$ e dos enlaces celulares $P_{s,c}$, para $\eta = 4$, são então dadas por (6) e (7), respectivamente, mostradas no final da próxima página [1].

G. Eficiência Espectral por Unidade de Área

Uma métrica de capacidade de rede amplamente empregada é a **eficiência espectral por unidade de área**, ou *area spectral efficiency* (ASE), que mede a quantidade de bits transmitidos corretamente por unidades de tempo, de banda, e de área. Nesse trabalho adotaremos a capacidade de Shannon² para determinar a taxa de bits conseguida com $\text{SINR} \geq \theta_x$. Portanto, a eficiência espectral por unidade de área das transmissões D2D é dada por $\text{ASE}_d = a \lambda_d \log_2(1 + \theta_d) P_{s,d}$, medida em bit/s/Hz/km².

¹Estamos desprezando aqui a correlação temporal da interferência, de forma que os processos pontuais em *time-slots* consecutivos são considerados independentes. A incorporação dessa correlação ficou para trabalhos futuros.

²Estamos: (i) aproximando a interferência por ruído gaussiano, (ii) desprezando o fato de que tal taxa pode implicar em palavras-código de tamanho infinito, levando a atrasos infinitos [8], e (iii) não estamos explorando as taxas maiores conseguidas com $\text{SINR} > \theta$.

III. ESTIMATIVA DA PROBABILIDADE DE SUCESSO DOS ENLACES D2D

A probabilidade de sucesso $P_{s,d}$ das transmissões D2D em (7) depende da densidade efetiva de interferentes D2D, dada por $(1 - \pi_0) \lambda_d$. Por outro lado, a probabilidade π_0 de uma fila estar vazia depende da probabilidade de serviço, dada por $P_{s,d}$. Esse problema de *causalidade* é resolvido aqui usando o procedimento iterativo proposto por Gharbich et. al [9], apresentado em **Algoritmo 1**. Em linhas gerais, o procedimento pode ser resumido como segue: na i -ésima iteração, calculamos $\pi_0^{[i+1]}$ a partir de $P_{s,d}^{[i]}$ usando (3), para o modo FD, ou a simulação descrita na Sec. II-E, para o modo HD; usando agora $\pi_0^{[i+1]}$, calcula-se $P_{s,d}^{[i+1]}$ usando (7), e o ciclo é repetido até a convergência.

Algoritmo 1: Estimação de π_0 e $P_{s,d}$

```

Inicializa  $\pi_0$ ;
while  $|\pi_0^{[i]} - \pi_0^{[i-1]}| \geq \epsilon$  do
    1. Estimar  $\pi_0^{[i]}$  usando simulação das filas, para o modo
       HD, ou a expressão (3), para o modo FD;
    2. Calcula  $P_{s,d}$  em (7) usando  $\pi_0^{[i]}$ ;
    3. Confere a condição de estabilidade;
    if  $P_{s,d} > a$  then
        | Repete o passo 1 para calcular  $\pi_0^{[i+1]}$ ;
    else
        | Retorna  $\pi_0 \leftarrow 0$  e calcule  $P_{s,d}$  em (7) para  $\pi_0 = 1$ ;
    end
    4. Incrementa  $i$ ;
end
Retorna  $\pi_0 \leftarrow \pi_0^{[i]}$  e  $P_{s,d}$ ;
    
```

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

São apresentados resultados numéricos para avaliar o impacto do modo de operação dos enlaces D2D (HD ou FD) no desempenho dos enlaces D2D. A Tabela I traz os valores dos parâmetros do sistema.

TABELA I: Valores dos parâmetros

Parâmetro	Valor
Dens. de estações rádio-base	$\lambda_b = 10$ BS/km ²
Dens. de terminais D2D	$\lambda_d = 100$ terminais/km ²
Dens. de terminais celulares	$\lambda_c = 100$ terminais/km ²
Máx. pot. TX	$P_u = 200$ mW
Pot. RX desejada	$\rho_c = \rho_d = -80$ dBm
Exp. perda de percurso	$\eta = 4$
Pot. ruído térmico	$\sigma^2 = -90$ dBm

Começamos mostrando, na Fig. 1, a probabilidade de sucesso dos enlaces D2D em função do limiar θ_d , para os

modos HD e FD, nesse último caso para diferentes valores de fração ζ de auto-interferência não cancelada. As curvas são

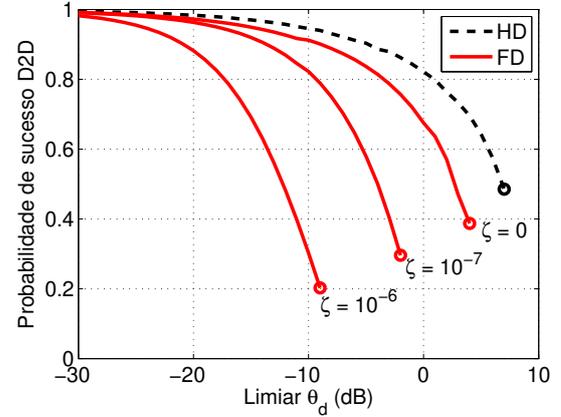


Fig. 1: Probabilidade de sucesso de transmissão D2D para probabilidade de chegada de pacotes $a = 0,1$, e diferentes valores de fração ζ . Os marcadores “o” indicam os limites da estabilidade da rede.

mostradas apenas para os cenários com as filas são estáveis. Vemos que o uso da comunicação FD reduz a probabilidade de sucesso, mesmo quando a auto-interferência é completamente eliminada ($\zeta = 0$). Portanto, se por um lado a comunicação FD tende a diminuir a probabilidade de um enlace unidirecional acessar o canal (isto é, π_0 aumenta), por outro lado, com comunicação FD temos mais transmissores transmitindo ao mesmo tempo e causando mais interferência. Os resultados mostram o “saldo” desses dois efeitos opostos, indicando que o segundo efeito supera o primeiro. Também fica claro o impacto da capacidade de cancelamento da auto-interferência, para o cenário considerado nesse experimento.

A Fig. 2 apresenta a eficiência espectral por área ASE_d das transmissões D2D, em função do limiar θ_d (note que θ_d está diretamente associado à taxa de transmissão nos enlaces). Vemos que, independentemente da duplexação, ao aumentarmos θ_d (que corresponde aumentar a taxa de bits atingida no enlace), ASE_d inicialmente cresce, pois a probabilidade de sucesso $P_{s,d}$ é alta. Porém, a partir de um certo valor de θ_d , a ASE_d passa a diminuir, pois há uma menor chance de sucesso de transmissão. A figura também mostra que, no cenário investigado, o uso de comunicação FD aumenta a eficiência espectral espacial, quando comparado àquela da comunicação HD. No entanto, vemos que a potência da auto-interferência nas transmissões FD controla não apenas o ganho de capacidade da rede (para altos valores de limiar θ_d), mas

$$P_{s,c} = \exp\left(-\frac{\theta_c \sigma^2}{\rho_c}\right) \exp\left\{-\pi\kappa\sqrt{\frac{\theta_c}{\rho_c}}\left[\lambda_b\mathbb{E}\left[\sqrt{P_c}\right]\arctan\left(\sqrt{\theta_c}\right) + (1 - \pi_0)\lambda_d\mathbb{E}\left[P_d^\delta\right]\right]\right\} \quad (6)$$

$$P_{s,d} = \mathbb{E}\left[\exp\left(-\frac{\theta_d\zeta P_d}{\rho_d\mathbb{1}_{FD}}\right)\right] \exp\left\{-\frac{\theta_d}{\rho_d}\sigma^2 - \pi\kappa\left(\frac{\theta_d}{\rho_d}\right)^\delta\left[\lambda_b\mathbb{E}\left[P_c^\delta\right] + (1 - \pi_0)\lambda_d\mathbb{E}\left[P_d^\delta\right]\right]\right\} \quad (7)$$

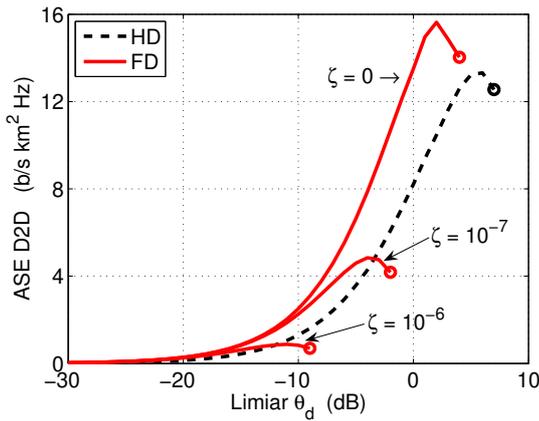


Fig. 2: ASE_d, nos modos HD e FD, para $\alpha = 0,1$, e diferentes valores de ζ . Os marcadores “o” indicam os limites da estabilidade da rede.

também o máximo valor de θ_d que garante a estabilidade³ das filas dos enlaces D2D (relembrando que as curvas foram traçadas apenas para o cenário com as filas estáveis). A instabilidade das filas está associada à baixa probabilidade de serviço das filas (i.e., $P_{s,d}$) para altos valores de θ . Portanto, vemos que, apesar de resultarem em uma maior capacidade da rede, as transmissões FD reduzem a máxima taxa de transmissão possível em cada enlace, devido à maior interferência na rede, mesmo para cancelamento total da auto-interferência.

Por fim, a Fig. 3 mostra o tempo médio de atraso de pacotes dos enlaces D2D nos modos HD e FD. Podemos ver que o

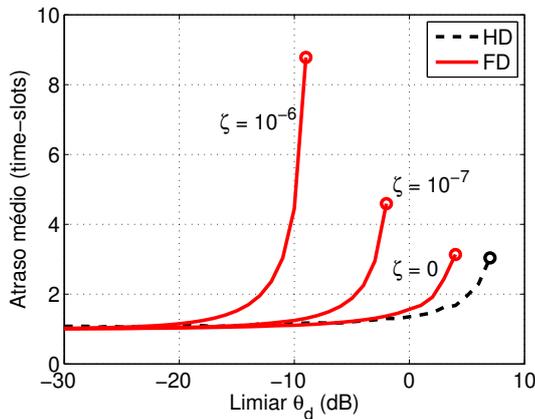


Fig. 3: Atraso médio de pacotes (em *time-slots*) para probabilidade de chegada de pacotes $\alpha = 0,1$.

aumento da eficiência espectral espacial obtida com o uso da comunicação FD é conseguido às custas de um maior atraso no enlace, mesmo quando o cancelamento da auto-interferência é total. Isto se deve ao fato de a rede ter mais dispositivos transmitindo e, aumentando-se a interferência sobre um dispositivo, aumenta-se a probabilidade de falha de transmissão do pacote,

³Adotamos uma definição *relaxada* para a estabilidade de rede. Uma análise mais rigorosa da estabilidade requer o uso do conceito de ϵ -stability [10], o que deixamos para trabalhos futuros.

aumentando assim a chance de sua fila ficar instável.

V. CONCLUSÕES

A comunicação FD tende a aumentar a vazão dos enlaces D2D bidirecionais, graças à possibilidade de transmissões simultâneas, esvaziando as filas dos transmissores mais frequentemente, e reduzindo a interferência na rede. No entanto, o maior número de terminais transmitindo ao mesmo tempo no modo FD tende a aumentar a interferência. Tudo somado, os resultados mostram que a capacidade espacial da rede aumenta com o uso da comunicação FD, mas às custas de um maior atraso no enlace.

REFERÊNCIAS

- [1] K. S. Ali, H. ElSawy, and M.-S. Alouini, “Modeling cellular networks with full-duplex d2d communication: A stochastic geometry approach,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 10, pp. 4409–4424, 2016.
- [2] S. Badri and M. Rasti, “Interference management and duplex mode selection in in-band full duplex d2d communications: A stochastic geometry approach,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 20, no. 6, pp. 2212–2223, 2021.
- [3] 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.
- [4] F. Baccelli, B. Błaszczyszyn, *et al.*, “Stochastic geometry and wireless networks,” *Foundations and Trends in Networking*, vol. 4, no. 1–2, 2010.
- [5] J. Lee and T. Q. Quek, “Device-to-device communication in wireless mobile social networks,” in *2014 IEEE 79th vehicular technology conference (VTC Spring)*, pp. 1–5, IEEE, 2014.
- [6] A. S. Alfa, *Applied Discrete-Time Queues*. Springer, 2016.
- [7] R. Rao and A. Ephremides, “On the stability of interacting queues in a multiple-access system,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 34, pp. 918–930, Sep 1988.
- [8] B. Rong and A. Ephremides, “Stable throughput, rate control, and delay in multi-access channels,” in *8th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks*, pp. 204–211, 2010.
- [9] M. Gharbieh, H. ElSawy, A. Bader, and M.-S. Alouini, “Spatiotemporal stochastic modeling of iot enabled cellular networks: Scalability and stability analysis,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 8, pp. 3585–3600, 2017.
- [10] Y. Zhong, M. Haenggi, T. Q. S. Quek, and W. Zhang, “On the stability of static poisson networks under random access,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 7, pp. 2985–2998, 2016.