

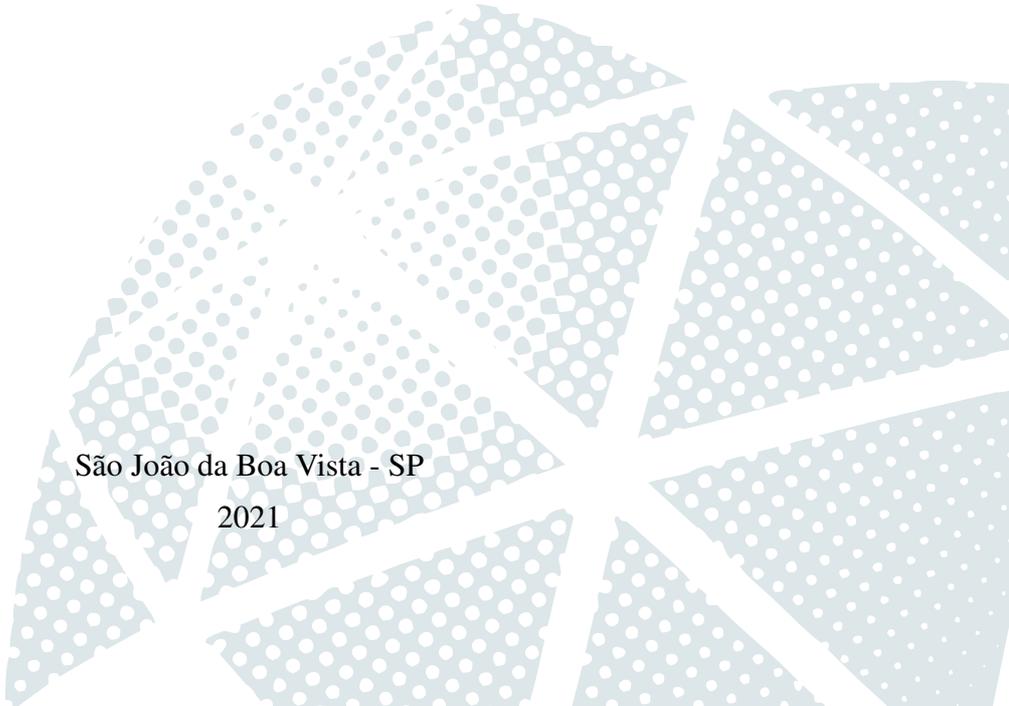
RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 17/01/2022.

DANIEL DE PAIVA MUCIN

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES ASSISTIDAS
POR VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS DO TIPO
FULL DUPLEX COM TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA
SEM FIO**

São João da Boa Vista - SP
2021



DANIEL DE PAIVA MUCIN

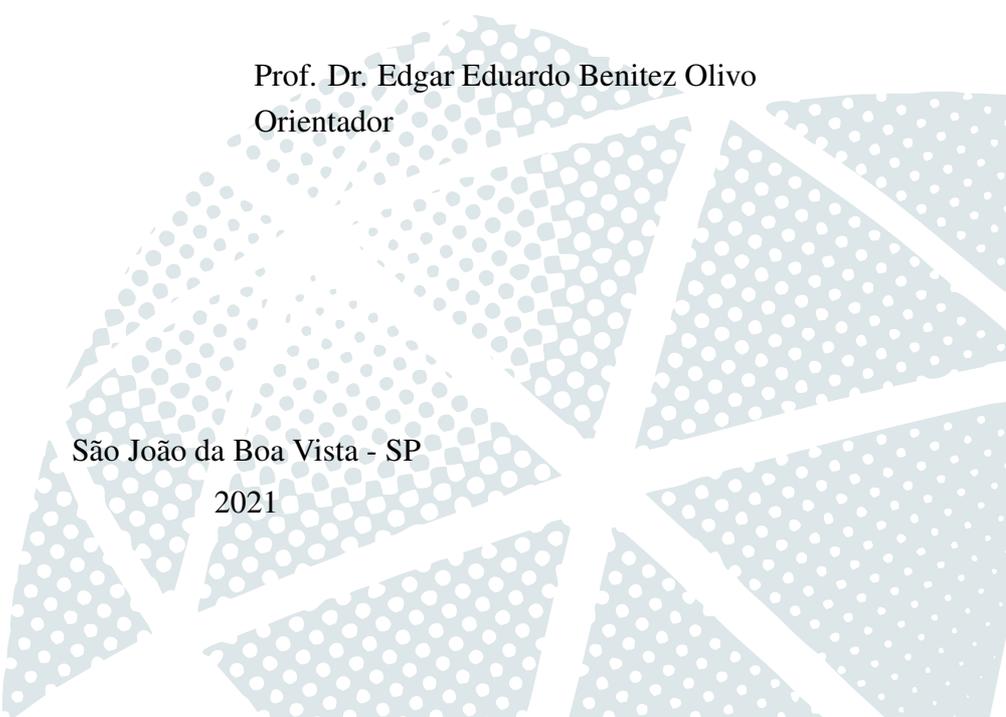
**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES ASSISTIDAS
POR VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS DO TIPO
FULL DUPLEX COM TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA
SEM FIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PGEE - ICTS/SJBV, câmpus de São João da Boa Vista, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo
Orientador

São João da Boa Vista - SP

2021



Mucin, Daniel de Paiva

M942a Análise de desempenho de redes assistidas por veículos aéreos não tripulados do tipo full duplex com transferência de energia sem fio / Daniel de Paiva Mucin. -- São João da Boa Vista, 2021
68 f.: il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Câmpus Experimental de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista

Orientador: Edgar Eduardo Benitez Olivo

1. Telecomunicações. 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3.
Probabilidades. 4. Energia Transferência. 5. Ondas milimétricas. I.
Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Câmpus Experimental de São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor.

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Análise de desempenho de redes assistidas por veículos aéreos não tripulados do tipo full duplex com transferência de energia sem fio

AUTOR: DANIEL DE PAIVA MUCIN

ORIENTADOR: EDGAR EDUARDO BENITEZ OLIVO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Sistemas Eletrônicos pela Comissão Examinadora:

Edgar Olivo
Prof. Dr. EDGAR EDUARDO BENITEZ OLIVO (Participação Virtual)
Coordenadoria de Curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações / Câmpus de São João da Boa Vista

Carlos Rafael Nogueira da Silva
Prof. Dr. CARLOS RAFAEL NOGUEIRA DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM)

Henry Carvajal Mora
Prof. Dr. HENRY RAMIRO CARVAJAL MORA (Participação Virtual)
Faculdade de Engenharia e Ciências Aplicadas, Engenharia em Telecomunicações / Universidad de Las Américas (UDLA)

Sorocaba, 16 de julho de 2021

À minha família, em especial aos meus pais Rovilso e Bernadete, aos meus irmãos Samuel, Verônica e Matheus e à minha companheira, Amanda, por todo amor, apoio, confiança, compreensão e incentivo em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus por sempre me guiar nos momentos de dificuldade e me dar forças para enfrentar as adversidades.

Aos meus pais, Rovilso e Bernadete, pelo apoio, amor e educação que me deram. Sem eles eu não seria metade do homem que sou.

À minha irmã, Verônica, pela disponibilidade e paciência em me auxiliar quando necessário, oferecendo meios para realizar este trabalho.

Gostaria de agradecer também, todo o apoio e conhecimento fornecidos pelo meu orientador, Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo. Este trabalho, assim como meu interesse pela pesquisa, são frutos de sua dedicação e paciência ao me orientar.

Agradeço a Prof. Dra. Diana Pamela Moya Osorio, pela disponibilidade em fornecer suporte e orientações para o desenvolvimento deste trabalho.

Por último, mas não menos importante, agradeço à minha companheira, Amanda, com quem compartilhei todos os momentos importantes nesses últimos anos de minha vida. Sem ela, não conseguiria forças para levantar a cabeça e seguir em frente.

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas causados
pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”*

Albert Einstein

RESUMO

Neste trabalho, o desempenho de uma rede assistida por um veículo aéreo não tripulado (VANT), que é alimentado por transferência de energia sem fio, é avaliado em termos da probabilidade de *outage*, considerando canais do tipo *fluctuating two-ray* (FTR). Em particular, o modelo FTR permite caracterizar o fenômeno de desvanecimento em uma ampla faixa de frequências, incluindo a faixa das ondas milimétricas. Nesse sistema, considera-se que o VANT coopera na comunicação entre fonte e destino, operando em modo de retransmissão *full duplex* e sob o protocolo amplifica-e-encaminha. No processo de comunicação, considera-se ainda as técnicas de transferência de energia sem fio (WET, *wireless energy transfer*), transferência simultânea de energia e informação sem fio (SWIPT, *simultaneous wireless information and power transfer*) e autorreciclagem de energia. O desempenho de *outage* do sistema é caracterizado por meio de uma expressão em forma integral obtida a partir de uma análise aproximada. Além disso, uma expressão fechada é obtida a partir de uma análise assintótica no regime de alta relação sinal-ruído. A fim de validar as expressões analíticas obtidas e avaliar o desempenho da rede em função dos parâmetros-chave do sistema, são implementadas simulações usando o método de Monte Carlo. Resultados obtidos mostram que alguns parâmetros do modelo FTR possuem maior influência nas curvas de desempenho e que para determinados valores de ganho médio do canal de autointerferência, presente no VANT, o desempenho do sistema pode degradar significativamente, independentemente dos valores dos parâmetros do modelo FTR.

Palavras-chave: *Fluctuating two-ray*. *Full duplex*. Ondas milimétricas. Probabilidade de *outage*. Veículo aéreo não tripulado. Transferência simultânea de energia e informação sem fio.

ABSTRACT

In this work, the performance of a wireless-powered unmanned aerial vehicle (UAV) assisted network under fluctuating two-ray (FTR) channels is assessed in terms of the outage probability. In particular, the FTR model allows to characterize the fading phenomenon in a wide range of frequencies, including that of millimeter waves. In this system, the UAV is considered to cooperate in the communication between source and destination, operating in full duplex relaying mode under the amplify-and-forward protocol. In the communication process, wireless energy transfer (WET), simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT), and self-recycling energy techniques are also considered. The outage performance of the system is characterized by means of an integral-form expression derived from an approximate analysis. Also, a closed-form expression is obtained from an asymptotic analysis at the high signal-to-noise ratio regime. Monte Carlo simulations are provided in order to validate the obtained analytical expressions as well as to evaluate the system performance in terms of key system parameters. Obtained results show that some parameters of the FTR model have greater influence on the performance curves and that for certain values of the average channel gain of the self-interference link, present in the UAV, the system performance can degrade significantly, regardless of the values of the FTR model parameters.

Keywords: Fluctuating two-ray. Full duplex. Millimeter waves. Outage probability. Simultaneous wireless information and power transfer. Unmanned aerial vehicle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de diversidade espacial, com múltiplas antenas espacialmente distribuídas no receptor D.	24
Figura 2	Esquema de diversidade cooperativa com a presença de enlace direto entre fonte e destino, e N nós retransmissores emulando um arranjo virtual de antenas (linha cheia: sinal de informação; linha tracejada: sinal de auto interferência).	25
Figura 3	Cenário cooperativo de dois saltos (<i>dual hop</i>) com um retransmissor do tipo HD.	26
Figura 4	Cenário cooperativo de dois saltos com um retransmissor do tipo FD.	27
Figura 5	Representação em diagrama de blocos de um dispositivo de captação de energia sem a unidade de gerenciamento de energia.	29
Figura 6	Representação em diagrama de blocos de um dispositivo de captação de energia com unidade de gerenciamento de energia.	30
Figura 7	Diagrama para exemplificação da técnica TS.	30
Figura 8	Diagrama para exemplificação da técnica PS.	30
Figura 9	Modelo do sistema (transmissão de informação: linha sólida; transferência de energia sem fio: linha pontilhada; sinal de interferência: linha tracejada.) . . .	32
Figura 10	Probabilidade de propagação LOS em função do ângulo de elevação para ambientes selecionados.	36
Figura 11	Esquema de transmissão do sistema, em que α denota um fator de alocação de tempo entre as fases WET e SWIPT.	37

- Figura 12 Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, γ_S , com $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; $\rho = 0,5$; e $h/d_{SD} = 0,24$ ($P_{2,LOS} = 87,88\%$, $P_{2,NLOS} = 12,12\%$), considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) e $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} \rightarrow \infty$ (desvanecimento *Rician*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} \in \{1;5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) para condições de propagação NLOS. 45
- Figura 13 Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, γ_S , para dois valores diferentes de $\Omega_{SI} = -5$ e -10 dB, com $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; $\rho = 0,5$; e $h/d_{SD} = 0,24$ ($P_{2,LOS} = 87,88\%$, $P_{2,NLOS} = 12,12\%$), considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} = 5$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) e $K_{LOS} = 5$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} \rightarrow \infty$ (desvanecimento *Rician*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} \in \{1;5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) para condições de propagação NLOS. 46
- Figura 14 Probabilidade de *outage* vs. fator de alocação de tempo entre as fases WET e SWIPT, α , com $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\rho = 0,5$; e $h/d_{SD} = 0,24$ ($P_{2,LOS} = 87,88\%$, $P_{2,NLOS} = 12,12\%$), considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) e $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} \rightarrow \infty$ (desvanecimento *Rician*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} \in \{1;5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) para condições de propagação NLOS. 47
- Figura 15 Probabilidade de *outage* vs. fator de divisão de potência na fase SWIPT, ρ , com $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; e $h/d_{SD} = 0,24$ ($P_{2,LOS} = 87,88\%$, $P_{2,NLOS} = 12,12\%$), considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) e $K_{LOS} \in \{1;5\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} \rightarrow \infty$ (desvanecimento *Rician*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} \in \{1;5\}$ (desvanecimento Nakagami- m) para condições de propagação NLOS. 48
- Figura 16 Probabilidade de *outage* vs. altura de voo normalizada do VANT, h/d_{SD} , com $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; e $\rho = 0,5$, considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} \in \{1;5;10;20\}$; $\Delta_{LOS} = 0$; $m_{LOS} = 5$ (desvanecimento *Rician shadowed*) para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} = 1$ (desvanecimento Rayleigh) para condições de propagação NLOS. 49

Figura 17	Probabilidade de <i>outage</i> vs. altura de voo normalizada do VANT, h/d_{SD} , com $\gamma_S = 30$ dB; $\Omega_{SI} = -10$ dB; $\eta = 0,5$; $\alpha = 0,5$; e $\rho = 0,5$, considerando diferentes cenários de desvanecimento FTR: $K_{LOS} = 5$; $\Delta_{LOS} \in \{0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1\}$; $m_{LOS} = 5$ para condições de propagação LOS; e $K_{NLOS} \rightarrow \infty$; $\Delta_{NLOS} = 0$; $m_{NLOS} = 1$ (desvanecimento Rayleigh) para condições de propagação NLOS.	51
Figura 18	Região de integração para o evento de <i>outage</i> no argumento de $\Pr(\cdot)$ em (41), R_1 , correspondente à CDF de A , $F_A(\cdot)$	54
Figura 19	Região de integração para o evento de <i>outage</i> no argumento de $\Pr(\cdot)$, R_2 , em (47), correspondente à CDF de Y , $F_Y(\cdot)$	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Relações entre o desvanecimento FTR e outros modelos de desvanecimento da literatura. Os parâmetros FTR são sublinhados para diferenciá-los dos casos especiais.	33
Tabela 2	Parâmetros empíricos para probabilidade de LOS em diferentes cenários.	35

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

5GB	Quinta Gerao e Geraes Futuras (<i>5G & Beyond</i>)
ADC	Conversor Analgico-Digital (<i>Analog-to-Digital Converter</i>)
AF	Amplifica-e-Encaminha (<i>Amplify-and-Forward</i>)
AWGN	Ruído Gaussiano Branco Aditivo (<i>Additive White Gaussian Noise</i>)
BER	Taxa de Erro de Bit (<i>Bit Error Rate</i>)
CDF	Funo de Distribuio Acumulada (<i>Cumulative Distribution Function</i>)
CSI	Informao do Estado de Canal (<i>Channel State Information</i>)
DC	Corrente Contnua (<i>Direct Current</i>)
DF	Decodifica-e-Encaminha (<i>Decode-and-Forward</i>)
DSC	Cancelador Digital de Autointerferncia (<i>Digital Self Interference Cancellor</i>)
EH	Captao de Energia (<i>Energy Harvesting</i>)
eMBB	Banda Larga Mvel Aprimorada (<i>Enhanced Mobile Broadband</i>)
FD	<i>Full Duplex</i>
FTR	<i>Fluctuating Two-Ray</i>
HD	<i>Half Duplex</i>
i.n.i.d	Independente e No Identicamente Distribuído (<i>independent and non-identically distributed</i>)
LOS	Linha de Visada (<i>Line-of-Sight</i>)
MIMO	Mltiplas Entradas e Mltiplas Sadas (<i>Multiple Input Multiple Output</i>)
mMTC	Comunicao Massiva do tipo Mquina (<i>Massive Machine-Type Communication</i>)
NLOS	Propagao sem Linha de Visada (<i>Non-Line-of-Sight</i>)
PDF	Funo Densidade de Probabilidade (<i>Probability Density Function</i>)
PS	Diviso no domnio da potncia (<i>Power Splitting</i>)
RF	Rdio Frequncia
SI	Autointerferncia (<i>Self-Interference</i>)
SINR	Relao Sinal-Interferncia-mais-Rudo (<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>)
SNR	Relao Sinal-Rudo (<i>Signal-to-Noise Ratio</i>)
SWIPT	Transferncia Simultnea de Energia e Informao Sem Fio (<i>Simultaneous Wireless Information and Power Transfer</i>)
TDMA	Acesso Mltiplo por Diviso de Tempo (<i>Time Division Multiple Access</i>)
TS	Comutao no Tempo (<i>Time Switching</i>)

UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
URLLC	Comunicação Ultra Confiável e de Baixa Latência (<i>Ultra-Reliable and Low-Latency Communications</i>)
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
WET	Transferência de energia sem fio (<i>Wireless Energy Transfer</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Fator de alocação de tempo
D	Nó destino
Δ	Parâmetro do desvanecimento FTR
d_{AB}	Distância do enlace entre os nós A e B
D_x	Coordenada x do nó destino
D_y	Coordenada y do nó destino
$E[\cdot]$	Esperança matemática
ε	Expoente de perda de percurso
η	Fator de eficiência de conversão de energia
E_{SWIPT}	Energia captada na fase SWIPT
E_{WET}	Energia captada na fase WET
$\lfloor \cdot \rfloor$	Função piso
\mathcal{G}	Fator de amplificação do protocolo AF
g_{AB}	Ganho de canal para o enlace entre os nós \mathcal{A} e \mathcal{B}
γ	SNR fim-a-fim instantânea recebida
γ_{e2e}	SINR fim-a-fim instantânea recebida
γ_S	SNR transmitida pela fonte
γ_{th}	Limiar alvo de SNR instantânea recebida para a probabilidade de <i>outage</i>
h	Altura de voo do VANT
h_{AB}	Coeficiente complexo do canal para o enlace entre os nós A e B
K	Parâmetro do desvanecimento FTR
L	Comprimento do bloco de retransmissão
λ	Comprimento de Onda
m	Parâmetro da distribuição Gamma com média unitária
N_0	Potência do ruído AWGN
N	Número de retransmissores
$n_D(t)$	Componente do ruído em D no instante t
$n_R(t)$	Componente de ruído em R no instante t
$\Omega_{\mathcal{A}\mathcal{B}}$	Ganho médio do canal para o enlace entre os nós \mathcal{A} e \mathcal{B}
ϕ	Fase aleatória uniformemente distribuída
P	Potência total disponível no sistema
p^{LOS}	Probabilidade de propagação com linha de visada
p^{NLOS}	Probabilidade de propagação sem linha de visada

P_{out}	Probabilidade de <i>outage</i> do sistema
P_{out}^{e2e}	Probabilidade de <i>outage</i> para rede de salto duplo
P_R	Potência transmitida do nó retransmissor
P_S	Potência transmitida do nó fonte
ρ	Fator de divisão de potência
R	VANT retransmissor
R_x	Coordenada x do VANT (ou retransmissor)
S	Nó fonte da rede
S_x	Coordenada x do nó fonte
S_y	Coordenada y do nó fonte
T	Intervalo de tempo
T_a	Atraso de processamento inerente ao modo de retransmissão FD
θ	Ângulo de elevação do VANT
V	Componente especular do desvanecimento FTR
X	Variável aleatória Gaussiana de média zero e variância σ^2
$x_R(t)$	Sinal retransmitido por R no instante t
$x_S(t)$	Sinal da informação transmitido por S no instante t
Y	Variável aleatória Gaussiana de média zero e variância σ^2
$y_D(t)$	Sinal recebido em D no instante t
$y_R(t)$	Sinal recebido em R no instante t
ζ	Variável aleatória de distribuição Gamma com média unitária

TRABALHOS PUBLICADOS PELO AUTOR

- D. P. Mucin, e E. E. B. Olivo, “*Desempenho de outage de redes assistidas por VANT operando em modo full duplex sob desvanecimento fluctuating two-ray e SWIPT,*” em Proc. XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT’20), Florianópolis, SC, Brasil, Nov. 2020.

OUTROS TRABALHOS PUBLICADOS PELO AUTOR

- E. G. Gomes, D. P. Mucin, e E. E. B. Olivo, “*Simulação e caracterização estatística de canais de desvanecimento do tipo fluctuating two-ray,*” em Proc. XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT’20), Florianópolis, SC, Brasil, Nov. 2020.
- D. P. Mucin, E. E. B. Olivo, e D. P. M. Osorio, “*Análise de outage para redes cooperativas-cognitivas com seleção oportunista e parcial de relays full duplex,*” em Proc. XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT’19), Petrópolis, RJ, Brasil, Out. 2019.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	TRABALHOS RELACIONADOS	18
1.3	CONTRIBUIÇÕES	20
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	COMUNICAÇÕES COOPERATIVAS	23
2.1.1	Protocolos de Retransmissão	24
2.1.2	Modos de Retransmissão	26
2.1.2.1	<i>Cancelamento de SI</i>	26
2.2	CAPTAÇÃO DE ENERGIA (EH)	28
2.3	TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA DE ENERGIA E INFORMAÇÃO SEM FIO (SWIPT)	29
3	MODELO DO SISTEMA E DE SINAIS	31
3.1	MODELO DO SISTEMA	31
3.1.1	Modelo de Desvanecimento <i>Fluctuating Two-Ray</i>	31
3.1.2	Parâmetros de Altitude do VANT e Probabilidade de Propagação LOS	34
3.1.3	Esquema de Transmissão de Informação e Transferência de Energia	35
3.2	ANÁLISE DE SINAIS	37
4	ANÁLISE DE <i>OUTAGE</i>	40
4.1	ANÁLISE APROXIMADA	41
4.2	ANÁLISE ASSINTÓTICA	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43

6	CONCLUSÕES	52
6.1	TRABALHOS FUTUROS	52
	Apêndice A – Cálculo da probabilidade de <i>outage</i> aproximada	53
	Apêndice B – Cálculo da probabilidade de <i>outage</i> assintótica	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados o contexto das redes móveis celulares atuais e as perspectivas para as redes futuras, em que a Seção 1.1 introduz a motivação deste trabalho; a Seção 1.2 apresenta trabalhos relacionados com o tema estudado; a Seção 1.3 apresenta as contribuições deste trabalho; e a Seção 1.4 elenca a organização deste trabalho.

1.1 MOTIVAÇÃO

Recentemente, as comunicações sem fio baseadas em veículos aéreos não tripulados (VANTs), popularmente denominados drones, têm recebido especial atenção da comunidade científica. Isso se deve ao fato dos VANTs apresentarem características específicas, tais como: facilidade em realizar manobras; capacidade de permanecerem estáveis em altitudes precisas; além de baixos custos de aquisição e manutenção (LI; FEI; ZHANG, 2018; TARIQ *et al.*, 2020).

No âmbito das redes móveis de quinta geração e de gerações futuras (5GB, 5G & *Beyond*), em que se espera prover um suporte robusto a um número massivo de dispositivos em uma área limitada (mMTC, *massive machine-type communications*); a maiores taxas de transmissão de dados (eMBB, *enhanced mobile broadband*); a comunicações ultra confiáveis e de baixíssima latência (URLLC, *ultra-reliable and low-latency communications*); e a maior eficiência energética (AGIWAL; ROY; SAXENA, 2016; HENRY; ALSOHAILY; SOUSA, 2020; POKHREL *et al.*, 2020), prevê-se que os VANTs sejam introduzidos como nós retransmissores, no contexto de comunicações cooperativas) que, ao transmitir além de sua própria informação e aquela proveniente de outros nós da rede, possibilitarão uma comunicação confiável e de longa distância entre um nó transmissor e outro receptor em ambientes com sombreamento severo, populosos ou até mesmo em cenários de catástrofe (MOZAFFARI *et al.*, 2019; ATIF *et al.*, 2021).

Quanto às técnicas cooperativas, dois protocolos de retransmissão são amplamente conhecidos, a saber: decodifica-e-encaminha (DF, *decode-and-forward*) (OLIVO *et al.*, 2015), em que o retransmissor decodifica as informações da fonte e então as recodifica antes de enviá-las ao destino; e amplifica-e-encaminha (AF, *amplify-and-forward*) (OSORIO *et al.*, 2017), em que o retransmissor apenas amplifica o sinal recebido de uma fonte, com ganho fixo ou variável, e depois o envia ao destino, exigindo menor complexidade de implementação quando comparado ao protocolo DF, enquanto mantém um desempenho comparável na região de média para alta relação sinal-ruído (SNR, *signal-to-noise ratio*). Além disso, os nós retransmissores podem operar em dois modos de retransmissão: *half duplex* (HD) e *full duplex* (FD). O modo FD

proporciona eficiência espectral aprimorada, uma vez que o retransmissor é capaz de receber e retransmitir simultaneamente as informações da fonte no mesmo canal de tempo-frequência, recuperando assim a perda em eficiência espectral inerente ao modo HD, que requer canais de tempo-frequência não sobrepostos para a transmissão e recepção de informações (OLIVO *et al.*, 2016). Porém, a penalidade neste caso advém da autointerferência (SI, *self-interference*) sofrida na antena receptora do retransmissor a partir de sua própria antena transmissora, em decorrência da retransmissão simultânea. Nesse sentido, as técnicas de mitigação de SI têm sido objeto de vários esforços de pesquisa baseados em propagação nos domínios analógico e digital (DUARTE; DICK; SABHARWAL, 2012; KORPI *et al.*, 2017).

Por outro lado, em busca de melhorar a eficiência energética em redes 5GB, a transferência de energia sem fio (WET, *wireless energy transfer*) pode ser usada para permitir que os dispositivos colem energia de sinais de rádio frequência (RF) (HUANG; XING; WANG, 2017). Além disso, técnicas de transferência simultânea de energia e informação sem fio (SWIPT, *simultaneous wireless information and power transfer*) têm sido propostas para fornecer um ganho de eficiência espectral além do obtido em eficiência energética, pois neste caso os dispositivos são capazes de dividir a energia do sinal de RF recebido em duas partes: uma para captação de energia (EH, *energy harvesting*) e um para decodificação de informações (EGASHIRA *et al.*, 2019). Neste contexto, duas técnicas são comumente utilizadas: comutação no tempo (TS, *time switching*), em que diferentes intervalos de tempo são alocados para EH e outro para decodificação de informação; e divisão no domínio da potência (PS, *power splitting*), em que o sinal de RF recebido é dividido em dois fluxos com diferentes níveis de potência, um dos quais é enviado a um circuito retificador para EH e outro é convertido em um sinal de banda base para decodificação de informação (KRIKIDIS *et al.*, 2014).

Em vista disso, as redes sem fio assistidas por VANT usando SWIPT têm recebido especial atenção da comunidade científica, pois o uso combinado de comunicações cooperativas e técnicas de SWIPT pode melhorar simultaneamente a confiabilidade, a eficiência espectral e a eficiência energética do sistema (vide, por exemplo, (ERNEST *et al.*, 2019; ZHENG *et al.*, 2019; Jayakody *et al.*, 2020)).

Além disso, a fim de atingir taxas de dados mais elevadas e atender aos requisitos de grandes volumes de tráfego de dados, a comunicação na faixa das ondas milimétricas é um viabilizador chave para este fim, devido à grande largura de banda disponível nesta parte do espectro de rádio frequência. No entanto, como desvantagem, os sinais na faixa das ondas milimétricas são mais sensíveis à atenuação da propagação do sinal e ao bloqueio deste por obstáculos. Neste sentido, as comunicações por ondas milimétricas podem ser auxiliadas por VANTs operando em uma certa altura, a fim de estender o alcance da transmissão e até mesmo fornecer um enlace de linha de visada (LOS, *line-of-sight*) entre o transmissor e o receptor (XIAO; XIA; XIA, 2016). Neste contexto, o modelo de desvanecimento *fluctuating two-ray* (FTR), recentemente

proposto em (ROMERO-JEREZ *et al.*, 2017), demonstrou fornecer um ajuste muito melhor em medições de campo para comunicações por ondas milimétricas, quando comparado com os modelos de desvanecimento Rayleigh e *Rician* (ROMERO-JEREZ *et al.*, 2017; SAMIMI *et al.*, 2016). De fato, o modelo de desvanecimento FTR é um modelo de canal estatístico generalizado que inclui as distribuições Rayleigh, *Rician*, Nakagami-*m*, Hoyt e *Rician Shadowed* como casos particulares, entre outros. Dessa forma, o modelo de desvanecimento FTR permite caracterizar uma ampla heterogeneidade de cenários de desvanecimento com e sem linha de visada (NLOS, *non-line-of-sight*), sendo um modelo adequado e versátil para comunicações assistidas por VANT operando na faixa de frequência das ondas milimétricas (ZHENG *et al.*, 2019).

1.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Quanto às redes sem fio assistidas por VANT, em (ERNEST *et al.*, 2019), uma análise de desempenho em termos da probabilidade de *outage* de uma rede cooperativa assistida por um VANT HD com uma estação terrestre FD foi realizada para canais com desvanecimento *Rician shadowed*, que é um dos casos particulares do modelo de desvanecimento FTR¹. No entanto, nesse trabalho, o uso de técnicas SWIPT não foi considerado.

Em (YANG *et al.*, 2018), a probabilidade de *outage* de uma rede cooperativa assistida por um VANT HD-AF com EH em um ambiente urbano foi avaliada. Nesse trabalho, os cenários de propagação LOS e NLOS foram caracterizados pelos desvanecimentos *Rician shadowed* e Rayleigh, respectivamente. Os autores observaram que nos cenários com alta SNR, a probabilidade de *outage* correspondente ao caso LOS é muito menor do que a correspondente ao caso NLOS e que ao elevar a altura de voo do VANT, a probabilidade de transmissão LOS é dominante e o desempenho do sistema também é aprimorado, enquanto que ao continuar com a elevação da altura de voo, o desempenho começa a se degradar devido ao maior efeito da perda de percurso no sistema. Contudo, esse trabalho considerou apenas o modo de retransmissão HD do VANT e, conseqüentemente, a eficiência espectral do sistema cai pela metade quando comparada com cenários em que se considera modo de retransmissão FD.

Por outro lado, em (ZHENG *et al.*, 2019), a probabilidade de *outage* de uma rede cooperativa assistida por um VANT operando sob os protocolos de retransmissão AF e DF com SWIPT foi analisada em canais de desvanecimento FTR. Nesse trabalho, os autores observaram que ao selecionar valores ótimos dos parâmetros do modelo de desvanecimento FTR, o desempenho do sistema avaliado pode ser aprimorado significativamente. Além disso, constataram que há um valor ótimo para o fator de alocação de tempo da técnica SWIPT, de modo que o desempe-

¹Ambos os modelos de desvanecimento são responsáveis por qualquer flutuação de amplitude nas componentes especulares (uma única componente especular no caso do modelo de desvanecimento *Rician shadowed*), como resultado de, por exemplo, dispersores em movimento rápido ou distúrbios eletromagnéticos na condição de propagação (ROMERO-JEREZ *et al.*, 2017).

nho do sistema também apresente ganhos significativos. No entanto, consideraram-se apenas o modo de retransmissão HD e, conseqüentemente, a eficiência espectral do sistema foi reduzida à metade quando comparada ao modo de retransmissão FD.

Em (Jayakody *et al.*, 2020), o desempenho de uma rede cooperativa assistida por um VANT FD operando sob o protocolo DF com SWIPT foi avaliado em termos da probabilidade de *outage* em canais de desvanecimento do tipo Rayleigh. Nesse sentido, foi proposta uma estratégia de retransmissão baseada em WET, na qual inicialmente é alocado um intervalo de tempo para alimentação sem fio do VANT desde a fonte, a fim de melhorar a vida útil da bateria e, conseqüentemente, seu tempo de voo, e, em um segundo intervalo de tempo, o VANT executa SWIPT com EH do enlace de autointerferência residual. Foi demonstrado pelos autores que a estratégia de retransmissão proposta apresentou ganhos de desempenho quando comparada com as estratégias de retransmissão tradicionais. No entanto, nesse trabalho considerou-se que os enlaces entre fonte e VANT e entre VANT e destino estão sujeitos a desvanecimento do tipo Rayleigh, assumindo portanto que não há linha de visada entre o VANT e os demais nós da rede, o que é esperado ocorrer com menor probabilidade em cenários práticos, já que a presença de linha de visada é uma das principais motivações para o uso de comunicações assistidas por VANTs.

Também, em (PERERA *et al.*, 2020), analisou-se a probabilidade de *outage* de uma rede cooperativa assistida por um VANT FD sob o protocolo DF e que utiliza da técnica SWIPT. Nesse trabalho, considerou-se a mesma estratégia de retransmissão de (Jayakody *et al.*, 2020), no entanto, foi considerado que os enlaces entre fonte e VANT e entre VANT e destino estão sujeitos a desvanecimento do tipo Nakagami- m . Os autores demonstraram que para determinados valores do parâmetro m do modelo de desvanecimento Nakagami- m , o desempenho em termos da probabilidade de *outage* do sistema avaliado pode ser aprimorado significativamente. Contudo, nesse trabalho não foram avaliados os impactos do protocolo AF no desempenho da rede. Além disso, o modelo de desvanecimento FTR, que apresenta um melhor ajuste a medições de campo para comunicações baseadas em ondas milimétricas, não foi considerado.

Em (JI *et al.*, 2020), foi avaliado o desempenho em termos da probabilidade de *outage* do sigilo de uma rede cooperativa cognitiva² assistida por múltiplos VANTs HD operando sob o protocolo DF com EH e um destino com múltiplas antenas. Nesse trabalho, considerou-se que todos os nós da rede experienciam desvanecimento Nakagami- m . Os autores demonstraram que o desempenho do sistema pode ser amplamente aprimorado com o aumento no número de VANTs cooperativos. Demonstrou-se que o desempenho também melhora ao aumentar o número de antenas do destino, contudo, nesse caso o desempenho tende a estabilizar, a partir de um determinado número de antenas para os diferentes cenários explorados. No entanto, esse

²As técnicas de rádio cognitivo permitem que os usuários não licenciados em uma rede sem fio (chamados de usuários secundários) obtenham conhecimento do entorno radioelétrico e adaptem seus parâmetros e configurações para acessar dinamicamente as bandas de frequência licenciadas, concedidas aos usuários primários (HAYKIN, 2005).

trabalho considerou apenas o modo de retransmissão HD e o uso de SWIPT não foi considerado; conseqüentemente, diminuindo a eficiência espectral geral da rede quando comparado com o caso em que se considera cenários com retransmissão FD com o uso de SWIPT.

Recentemente, em (LI; ZHAO, 2021), solucionou-se um problema de maximização da taxa de transmissão de dados, a fim de otimizar, por meio de um algoritmo, as potências de transmissão dos usuários secundários e de um VANT cooperativo HD em uma rede cooperativa cognitiva operando sob o protocolo DF com EH, considerando quatro trajetórias fixas. Nesse trabalho, foi considerado que os enlaces terrestres-aéreos são LOS, nos quais considera-se que os canais são modelados pela perda de percurso para caracterizar os efeitos de grande escala e pelo desvanecimento *Rician* para caracterizar os efeitos de pequena escala. Os autores concluíram que as simulações para as quatro trajetórias fixas demonstram que o algoritmo de controle de potência proposto pode efetivamente otimizar a taxa de transmissão da rede secundária, protegendo a comunicação da rede primária. Porém, nesse trabalho não foi considerado o modo de retransmissão FD para o VANT e o uso de SWIPT, como em (JI *et al.*, 2020), o que diminui a eficiência espectral da rede quando comparada com o caso em que se considera FD e SWIPT.

Mais recentemente, em (LE *et al.*, 2021), as expressões fechadas e exatas da probabilidade de *outage* e da taxa de transmissão foram derivadas para um sistema de localização sem fio baseado em um VANT HD-DF com EH. Considerou-se o canal de desvanecimento Nakagami-*m* para caracterizar os efeitos de pequena escala e o canal de sombreamento Lognormal para caracterizar os efeitos de grande escala. No entanto, nesse trabalho não foi utilizada a técnica SWIPT e o modo de retransmissão FD e, conseqüentemente, a eficiência espectral da rede não foi totalmente explorada, uma vez que o VANT FD usando SWIPT permite maiores ganhos em eficiência espectral.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

Apesar das importantes contribuições dos trabalhos apresentados até o momento, o entendimento de limites fundamentais de desempenho para redes cooperativas assistidas por VANT com alimentação sem fio sob canais em ondas milimétricas ainda está aberto para investigação. Este trabalho procura contribuir nesse contexto. Em particular, considera-se uma configuração de rede que consiste em uma fonte que se comunica com um destino, auxiliada por um VANT com alimentação sem fio. Nesta configuração, assume-se que o VANT opera no modo de retransmissão FD e sob o protocolo AF. O modelo de canal FTR é considerado para caracterizar os efeitos de desvanecimento na faixa de frequência das ondas milimétricas. Motivados por (Jayakody *et al.*, 2020), a fim de melhorar a eficiência espectral e energética do sistema, considera-se que cada bloco de transmissão é composto por duas fases consecutivas: (i) uma fase WET para alimentar o VANT por meio de sinais de RF vindos da fonte e (ii) uma fase SWIPT baseada em PS para permitir que o VANT simultaneamente colete energia e decodi-

fique informações do sinal da fonte, bem como realize auto-reciclagem de energia a partir de seu enlace de autointerferência, inerente ao modo de operação FD. Além disso, não há literatura abordando o estudo de redes sem fio assistidas por VANT FD operando sob o protocolo AF com SWIPT sobre canais FTR³. A seguir estão listadas as principais contribuições deste trabalho:

- É obtida uma expressão analítica para a relação sinal-interferência-mais-ruído (SINR, *signal-to-interference-plus-noise ratio*) fim-a-fim instantânea recebida.
- Uma expressão em forma integral para a probabilidade de *outage* aproximada do sistema considerado é derivada e sua acurácia verificada por simulações numéricas para diferentes casos ilustrativos. Vale ressaltar que o problema sob estudo mostra-se bastante complexo, tendo em vista a complexidade do modelo do sistema, como será detalhado posteriormente.
- Para reduzir a complexidade computacional do resultado analítico aproximado mencionado anteriormente, uma expressão compacta e de forma fechada para a probabilidade de *outage* é derivada de uma análise assintótica em regime de alta SNR.
- O impacto dos principais parâmetros do sistema no desempenho *outage* é investigado, incluindo o fator de alocação de tempo entre as fases WET e SWIPT, o ganho médio do canal de autointerferência e os parâmetros do modelo de desvanecimento FTR.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Os demais capítulos deste trabalho são apresentados abaixo, em que:

- O Capítulo 2 apresenta a fundamentação de alguns conceitos-chave para a compreensão do trabalho.
- O Capítulo 3 apresenta o modelo do sistema e a caracterização do modelo de sinais, a partir do qual a SINR fim-a-fim instantânea recebida para a rede considerada é obtida.
- Em seguida, a probabilidade de *outage* é investigada no Capítulo 4 por meio das análises aproximada e assintótica.
- O Capítulo 5 ilustra os resultados numéricos para os cenários considerados, que validam as análises anteriores.
- Finalmente, o Capítulo 6 conclui este trabalho.

³Como mencionado anteriormente, tem-se que em (Jayakody *et al.*, 2020) os autores abordaram uma rede cooperativa assistida por VANT FD baseada no protocolo DF sobre desvanecimento de Rayleigh

Notação: Ao longo deste trabalho, utiliza-se $f_X(\cdot)$ e $F_X(\cdot)$ para denotar a função densidade de probabilidade (PDF, *probability density function*) e a função de distribuição acumulada (CDF, *cumulative distribution function*) de uma variável aleatória X , respectivamente, $E[\cdot]$ para denotar a esperança matemática, $\Pr[\cdot]$ para denotar probabilidade, e “ \simeq ” para denotar a equivalência assintótica.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi analisado o desempenho de *outage* de uma rede cooperativa assistida por VANT FD-AF alimentado por transferência de energia sem fio considerando canais de desvanecimento FTR. Foram obtidas expressões analíticas para a probabilidade de *outage* com base em abordagens aproximadas e assintóticas. Em particular, a expressão assintótica em forma fechada obtida mostrou que os parâmetros de desvanecimento FTR correspondentes ao primeiro e segundo salto não têm um impacto significativo no desempenho de *outage* do sistema na região de alta SNR. Nesse caso, o desempenho mostrou-se governado principalmente pelo efeito da SI residual que leva a patamares de *outage*, conforme corroborado pelos resultados das simulações. Em geral, verificou-se que o impacto do parâmetro K_{LOS} no desempenho do sistema prevalece sobre os demais parâmetros do canal de desvanecimento, resultando em uma melhora significativa no desempenho do sistema conforme K_{LOS} aumenta. Além disso, para valores elevados de K_{LOS} (correspondendo a cenários de forte componente especular), o ganho de desempenho do sistema devido a um aumento no parâmetro m_{LOS} é mais perceptível. Além disso, foi observado que, para valores elevados de K_{LOS} e m_{LOS} , o desempenho de *outage* diminui à medida que Δ_{LOS} aumenta, uma vez que as componentes especulares se combinam de forma destrutiva com mais frequência. Também pôde-se observar que o desempenho de *outage* do sistema permanece aproximadamente o mesmo à medida que a altura de voo normalizada do VANT aumenta, uma vez que tanto a probabilidade de propagação LOS no segundo salto quanto a perda de percurso nos enlaces entre o VANT e os nós terrestres aumentam.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando a análise de desempenho de *outage* da rede apresentada neste trabalho, foi adotado um cenário estático, em que o VANT opera a uma certa altura fixa em relação ao solo. Portanto, um possível trabalho futuro seria considerar cenários em que o VANT possua uma mobilidade e que algoritmos de otimização de trajetórias sejam considerados. Outro possível trabalho futuro seria considerar a utilização de múltiplas antenas nos nós transmissor e receptor, a fim de avaliar ganhos de diversidade espacial no sistema.

REFERÊNCIAS

- AGENCY, E. U. A. S. *How high can i fly my drone?* [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.easa.europa.eu/>>. Acesso em: 20 Jan. 2021.
- AGIWAL, M.; ROY, A.; SAXENA, N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 1617–1655, 2016.
- ALEVIZOS, P. N.; BLETSAS, A. Sensitive and nonlinear far-field rf energy harvesting in wireless communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 17, n. 6, p. 3670–3685, 2018.
- ATIF, M. *et al.* Uav-assisted wireless localization for search and rescue. *IEEE Systems Journal*, p. 1–12, 2021.
- BADARNEH, O. S.; COSTA, D. B. da. Cascaded fluctuating two-ray fading channels. *IEEE Communications Letters*, IEEE, v. 23, n. 9, p. 1497–1500, 2019.
- DUARTE, M.; DICK, C.; SABHARWAL, A. Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 11, n. 12, p. 4296–4307, 2012.
- EGASHIRA, E. N. *et al.* Secrecy performance of untrustworthy af relay networks using cooperative jamming and swipt. In: *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- ERNEST, T. Z. H. *et al.* A power series approach for hybrid-duplex UAV communication systems under Rician shadowed fading. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 76949–76966, 2019.
- EVERETT, E.; SAHAI, A.; SABHARWAL, A. Passive self-interference suppression for full-duplex infrastructure nodes. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 13, n. 2, p. 680–694, 2014.
- GOLDSMITH, A. *Wireless communications*. [S.l.]: Cambridge university press, 2005.
- GRADSHTEYN, I.; RYZHIK, I. *Table of Integrals, Series, and Products, 8th edn., ed. by D. Zwillinger*. [S.l.]: Elsevier Academic Press, Waltham, MA, 2015.
- HAYKIN, S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 23, n. 2, p. 201–220, 2005.
- HENRY, S.; ALSOHAILY, A.; SOUSA, E. S. 5g is real: Evaluating the compliance of the 3gpp 5g new radio system with the itu imt-2020 requirements. *IEEE Access*, v. 8, p. 42828–42840, 2020.

- HOLIS, J.; PECHAC, P. Elevation dependent shadowing model for mobile communications via high altitude platforms in built-up areas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 56, n. 4, p. 1078–1084, 2008.
- HUANG, J.; XING, C.-C.; WANG, C. Simultaneous wireless information and power transfer: Technologies, applications, and research challenges. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 55, n. 11, p. 26–32, 2017.
- Jayakody, D. N. K. *et al.* Self-energized uav-assisted scheme for cooperative wireless relay networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 69, n. 1, p. 578–592, 2020.
- Ji, B. *et al.* Secrecy performance analysis of uav assisted relay transmission for cognitive network with energy harvesting. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 69, n. 7, p. 7404–7415, 2020.
- KIM, D.; LEE, H.; HONG, D. A survey of in-band full-duplex transmission: From the perspective of PHY and MAC layers. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 17, n. 4, p. 2017–2046, 2015.
- KORPI, D. *et al.* Compact inband full-duplex relays with beyond 100 db self-interference suppression: Enabling techniques and field measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 65, n. 2, p. 960–965, 2017.
- KRIKIDIS, I. *et al.* Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 52, n. 11, p. 104–110, 2014.
- LANEMAN, J. N.; TSE, D. N.; WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information theory*, IEEE, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, 2004.
- LE, A. T. *et al.* Beam-based analog self-interference cancellation in full-duplex mimo systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 19, n. 4, p. 2460–2471, 2020.
- LE, N. P. *et al.* Energy-harvesting aided unmanned aerial vehicles for reliable ground user localization and communications under lognormal-nakagami- m fading channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 70, n. 2, p. 1632–1647, 2021.
- LI, B.; FEI, Z.; ZHANG, Y. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 2241–2263, 2018.
- LI, H.; ZHAO, X. Throughput maximization with energy harvesting in uav-assisted cognitive mobile relay networks. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, v. 7, n. 1, p. 197–209, 2021.
- LIOLIOU, P. *et al.* Self-interference suppression in full-duplex mimo relays. In: *2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 658–662.
- LIU, G. *et al.* In-band full-duplex relaying: A survey, research issues and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 2, p. 500–524, 2015.

- MA, J. *et al.* A new coupling channel estimator for cross-talk cancellation at wireless relay stations. In: *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–6.
- MIKEKA, C.; ARAI, H. Design issues in radio frequency energy harvesting system. *Sustainable Energy Harvesting Technologies-Past, Present and Future*, InTech Europe, p. 235–256, 2011.
- MOZAFFARI, M. *et al.* A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 21, n. 3, p. 2334–2360, 2019.
- NWANKWO, C. D. *et al.* A survey of self-interference management techniques for single frequency full duplex systems. *IEEE Access*, v. 6, p. 30242–30268, 2018.
- OLIVO, E. B. *et al.* Multiuser incremental decode-and-forward relaying under outdated channel estimates. *Electronics Letters*, IET, v. 51, n. 4, p. 369–371, 2015.
- OLIVO, E. E. B. *et al.* An adaptive transmission scheme for cognitive decode-and-forward relaying networks: Half duplex, full duplex, or no cooperation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, IEEE, v. 15, n. 8, p. 5586–5602, 2016.
- OSORIO, D. P. M. *et al.* Exploiting the direct link in full-duplex amplify-and-forward relaying networks. *IEEE Signal Processing Letters*, IEEE, v. 22, n. 10, p. 1766–1770, 2015.
- OSORIO, D. P. M. *et al.* An adaptive transmission scheme for amplify-and-forward relaying networks. *IEEE Transactions on Communications*, v. 65, n. 1, p. 66–78, 2017.
- OSTAFFE, H. *et al.* RF-based wireless charging and energy harvesting enables new applications and improves product design. *Powercast Corporation*, 2017.
- PAPOULIS, A. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. 4th. ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002.
- PERERA, T. D. P. *et al.* Wireless-powered UAV assisted communication system in Nakagami-m fading channels. In: IEEE. *2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. [S.l.], 2020. p. 1–6.
- POKHREL, S. R. *et al.* Towards enabling critical mmTc: A review of URLLC within mmTc. *IEEE Access*, v. 8, p. 131796–131813, 2020.
- ROMERO-JEREZ, J. M. *et al.* The fluctuating two-ray fading model: Statistical characterization and performance analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, IEEE, v. 16, n. 7, p. 4420–4432, 2017.
- SAMIMI, M. K. *et al.* 28 GHz millimeter-wave ultrawideband small-scale fading models in wireless channels. In: IEEE. *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.], 2016. p. 1–6.
- SUDEVALAYAM, S.; KULKARNI, P. Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 13, n. 3, p. 443–461, 2011.

- TARIQ, F. *et al.* A speculative study on 6G. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 27, n. 4, p. 118–125, 2020.
- TSE, D.; VISWANATH, P. *Fundamentals of wireless communication*. [S.l.]: Cambridge university press, 2005.
- XIAO, Z.; XIA, P.; XIA, X.-G. Enabling UAV cellular with millimeter-wave communication: Potentials and approaches. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 54, n. 5, p. 66–73, 2016.
- YANG, L. *et al.* Outage performance of uav-assisted relaying systems with rf energy harvesting. *IEEE Communications Letters*, IEEE, v. 22, n. 12, p. 2471–2474, 2018.
- ZHANG, J. *et al.* New results on the fluctuating two-ray model with arbitrary fading parameters and its applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 67, n. 3, p. 2766–2770, 2017.
- ZHENG, J. *et al.* Wireless powered UAV relay communications over fluctuating two-ray fading channels. *Physical Communication*, Elsevier, v. 35, p. 100724, 2019.