

Desempenho do Long-Range Frequency Hopping Spread Spectrum em Cenários com Desvanecimento

Misael Rosa da Costa, Paulo Henrick Marconato Zakalugem, Jamil Farhat e Glauber Brante

Resumo— O *Long-Range Frequency Hopping Spread Spectrum* (LR-FHSS) caracteriza-se como um esquema de modulação voltado para redes de Internet das Coisas com alta densidade de dispositivos. Neste trabalho, avaliamos sistematicamente o desempenho do LR-FHSS sob diferentes níveis de severidade de desvanecimento (*fading*), com ênfase nos *Data Rates* DR8 e DR9, empregando simulações baseadas em eventos discretos e validação por modelos teóricos. Utilizando como métricas a probabilidade de sucesso na transmissão e o *goodput*, demonstramos que o esquema apresenta degradação progressiva de desempenho proporcional à intensidade do desvanecimento. Os resultados não apenas corroboram os modelos teóricos, mas também evidenciam que a eficiência do sistema é criticamente afetada em ambientes adversos. Esses achados destacam a necessidade de técnicas de mitigação que possibilitem viabilizar a adoção do LR-FHSS em cenários diversos.

Palavras-Chave— LR-FHSS, Internet das Coisas, Desvanecimento Nakagami- m , Desvanecimento Rician.

Abstract— The Long-Range Frequency Hopping Spread Spectrum (LR-FHSS) emerges as a modulation scheme specifically designed for Internet of Things networks with high density of devices. In this work, we systematically evaluate the performance of LR-FHSS under different fading severity levels, with emphasis on Data Rates DR8 and DR9, employing discrete-event simulations and theoretical model validation. Using transmission success probability and goodput as key metrics, we demonstrate that the scheme exhibits progressive performance degradation proportional to fading intensity. Our results not only corroborate theoretical models but also reveal that system efficiency is critically impaired in adverse channel conditions. These findings highlight the necessity for mitigation techniques to enable effective LR-FHSS deployment across diverse scenarios.

Keywords— LR-FHSS, Internet of Things, Nakagami- m fading, Rician fading.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve um crescimento expressivo da Internet das Coisas (*Internet-of-Things*, IoT). Estima-se que o número médio de dispositivos IoT por pessoa salte de aproximadamente 7 em 2020, para pouco mais de 30 em 2030 e o mercado global de IoT atinja um valor em torno de 8 bilhões de dólares no mesmo ano [1]. Além disso, espera-se

M. R. da Costa e P. H. M. Zakalugem, Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba-PR. E-mails: {misael, pauloz}@alunos.utfpr.edu.br. J. Farhat e G. Brante, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informacional Industrial (CPGEEI), UTFPR, Curitiba-PR. E-mails: {jamilfarhat, gbrante}@utfpr.edu.br.

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (307226/2021-2).

que em 2050 existam 24 bilhões de dispositivos interconectados [2]. Com um mercado tão grande e em contínua expansão, surgem várias aplicações para o uso da tecnologia, cada uma com suas especificidades e requisitos. Pode-se agrupar esses casos em dois grupos principais: *massive* IoT para casos com alta densidade de conexões e *critical* IoT para atividades industriais e críticas que exigem baixa latência [3]. Esses grupos também são conhecidos como *massive machine-type communication* (mMTC) e *ultra-reliable low-latency communications* (URLLC), respectivamente.

Dentro do grupo de *massive* IoT, destacam-se as necessidades de baixo consumo, baixo custo, pequenos volumes de dados, número massivo de dispositivos e, muitas vezes, longo alcance. Diante desse cenário, a tecnologia de rede sem fio *Long Range* (LoRa) se popularizou como uma forma de alcançar tais objetivos. LoRa é uma tecnologia de camada física *Low-Power Wide-Area Network* (LPWAN), de propriedade da Semtech Corporation, que usa como esquema de modulação o *Chirp Spread Spectrum* (CSS) [4]. Embora essa tecnologia apresente uma alta compatibilidade com o cenário de *massive* IoT, ela também apresenta limitações no que tange ao número de dispositivos se comunicando ao mesmo tempo [5], o que configura um grande problema. Em acréscimo, a necessidade de melhoria na robustez contra interferências, maior escalabilidade e redução de perda de pacotes, em conjunto com o aumento da capacidade de dispositivos na rede, levou ao desenvolvimento de novas tecnologias.

Diante dessas limitações, em 2020 a Semtech lançou uma nova versão de camada física, chamada *Long-Range Frequency Hopping Spread Spectrum* (LR-FHSS) que utiliza espalhamento espectral com salto em frequência em transmissões *uplink*, mantendo LoRa na comunicação *downlink* [6]. Embora o LR-FHSS não aumente o número de pacotes que pode ser transmitido por cada dispositivo comparado ao protocolo LoRa tradicional, LR-FHSS aumenta a capacidade da rede [6], *i.e.*, possibilita uma maior escalabilidade, para que mais dispositivos possam se comunicar ao mesmo tempo. Isso é possível pois o LR-FHSS divide o *payload* em fragmentos, os quais são espalhados em múltiplos canais seguindo um padrão de salto em frequência pré-estabelecido, além de transmitir algumas réplicas do cabeçalho em diferentes frequências [7], [8]. Além disso, o receptor não precisa receber todos os *bits* do *payload*; basta receber uma réplica do cabeçalho e uma fração dos *bits* do *payload* para que o receptor consiga recuperar o pacote, aumentando a robustez contra interferências [6].

LR-FHSS é um tema recente e que tem atraído a atenção da comunidade acadêmica. Uma visão geral do funcionamento do LR-FHSS, bem como uma análise de seu desempenho e

limitações, é apresentada em [6], destacando suas capacidades e desafios em redes IoT. Em [9] os autores investigam a escalabilidade de redes LR-FHSS em cenários de comunicação direta com satélites (*Direct-to-Satellite*, DtS), mostrando que o LR-FHSS suporta redes DtS de larga escala com comunicação infrequente. Em [10] é proposto o uso do *Dynamic Frequency Hopping* (DFH) para aprimorar o desempenho do LR-FHSS por meio da seleção dinâmica de sequências de salto baseadas na qualidade dos subcanais, obtendo melhoria de até 2,76 vezes na taxa de recepção. Os autores em [11] demonstram uma abordagem analítica para derivar a probabilidade de *outage* em uma rede IoT baseada em satélites, validada por simulações. Em [12] se propõe a integração do esquema de comunicação *Device-to-Device* (D2D) com o LR-FHSS, juntamente com técnicas de codificação em rede para obter aumento de performance em um cenário de redes satelitais com desvanecimento *shadowed-Rice*, obtendo aumento de até 249,9% na capacidade da rede. Um esquema de combinação de cabeçalhos com auxílio de codificação em rede é utilizado em [7] para aumentar a robustez contra perdas e colisões, reduzindo a taxa de erro em mais de uma ordem de magnitude em diversos cenários. Em [8] o protocolo de diversidade Aloha com resolução assíncrona é utilizado para melhoria de desempenho contra colisões, dobrando o *goodput* e aumentando em até 60% a média de sucesso da rede. Recentemente, [13] explora a probabilidade de colisões de pacotes em redes IoT satelitais tanto para LoRa, quanto para LR-FHSS, mostrando que o último permite maior número de transmissões simultâneas.

Apesar de o LR-FHSS transmitir o cabeçalho múltiplas vezes e possuir outras técnicas para impedir interferência, existe ainda a possibilidade de se perder pacotes em razão dos efeitos do desvanecimento, devido a variações na amplitude e fase do sinal recebido em função da propagação em multi-percursos [14]. Entretanto, observa-se que tais efeitos foram desconsiderados em grande parte dos estudos da literatura recente, ou, mesmo quando o desvanecimento foi considerado, os resultados foram aplicados apenas em redes satelitais. Dessa forma, este trabalho analisa o desempenho de redes LR-FHSS terrestres com nós distribuídos uniformemente em um raio de distância determinada em relação a um *gateway* levando em conta os efeitos de desvanecimento em pequena escala. Como ponto de partida, foi utilizado o simulador desenvolvido em [15], o qual que permite selecionar parâmetros LR-FHSS ajustáveis ao cenário estudado, tais como número de dispositivos da rede, raio em que os dispositivos estão distribuídos, potência de transmissão, sensibilidade do receptor, entre outros. Assim, modificamos o simulador de [15] para considerar desvanecimento do tipo Nakagami- m e Rician, as quais podem ser ajustadas a uma gama de cenários práticos [14], [16]. Os resultados quantificam a degradação no desempenho tanto em termos de probabilidade de sucesso quanto de *goodput*, para parâmetros das distribuições Nakagami- m e Rician.

II. MODELO DE SISTEMA

O LR-FHSS é uma técnica de modulação recentemente incorporada à especificação do LoRaWAN, que emprega espalhamento espectral com salto em frequência para aumentar a

capacidade de *uplink* em redes densas. Nesta técnica, a largura de banda disponível é organizada em 8 *grids* de frequência, denominados *Operating Channel Width* (OCW), cada um subdividido em canais de 488 Hz conhecidos como *Occupied Band Width* (OBW). A configuração específica desses *grids* varia de acordo com os parâmetros regionais definidos na implementação do sistema [7]. A transmissão LR-FHSS envolve dois componentes principais: múltiplas réplicas do cabeçalho e fragmentos do *payload*. O cabeçalho, que contém informações críticas incluindo a sequência de saltos em frequência, é transmitido em várias cópias, dependendo do *Data Rate* (DR) selecionado, cada uma com um *Time on Air* (ToA) fixo de $t_H = 233,472$ ms. O *payload*, por sua vez, é codificado através de um esquema convolucional e dividido em fragmentos com ToA de $t_F = 102,4$ ms cada. Tanto as réplicas do cabeçalho quanto os fragmentos do *payload* são transmitidos seguindo um padrão pseudoaleatório de saltos entre os canais OBW dentro do mesmo *grid* OCW [6]. Esta abordagem proporciona robustez contra interferências e colisões em ambientes com alta densidade de dispositivos.

Para este trabalho, consideramos uma rede LR-FHSS com M dispositivos IoT distribuídos uniformemente em uma distância de 0 até D ao redor de um *gateway* central. Cada dispositivo $i \in \{1, \dots, M\}$, localizado a uma distância d_i do *gateway*, transmite pacotes contendo L bytes de *payload*. A rede opera com C canais por *grid* de frequência, onde os intervalos entre transmissões seguem uma distribuição exponencial $z \sim \text{Exp}(\lambda)$ [17]. A estrutura dos pacotes LR-FHSS emprega duas técnicas para aumentar a robustez: replicação de cabeçalho e fragmentação de *payload*. Especificamente, cada pacote é composto por H réplicas do cabeçalho e $F = \lceil (L+3)/(6 \text{ CR}) \rceil$ fragmentos do *payload*, sendo CR a taxa de codificação convolucional e $\lceil \cdot \rceil$ a operação de arredondamento para cima.

A. Probabilidade de Sucesso

O modelo de canal considera a potência recebida no *gateway* a partir da transmissão de cada dispositivo i , dada por

$$\mathcal{P}_{r,i} = \frac{\mathcal{P}_{t,i} |h_i|^2}{d_i^4}, \quad (1)$$

onde $\mathcal{P}_{t,i}$ é a potência de transmissão do i -ésimo dispositivo IoT e $|h_i|^2$ modela o ganho do canal com desvanecimento. Considerando que todos os canais sem fio seguem o mesmo modelo de pequena escala, tal que $h = h_i, \forall i$, a partir de (1) temos que a probabilidade de *outage* ocorre quando a potência recebida fica abaixo de um limiar mínimo φ , sendo definida matematicamente por

$$\mathcal{O}_\alpha = \mathbb{E}_d \left\{ \mathbb{P} \left(|h|^2 < \frac{\varphi d_i^4}{\mathcal{P}_{t,i}} \right) \right\}. \quad (2)$$

onde α indica o modelo de desvanecimento considerado, podendo ser $\alpha = \{\text{Nakagami} - m, \text{Rician}\}$, enquanto $\mathbb{E}_d\{\cdot\}$ representa uma média em função da distância de todos os dispositivos IoT em relação ao *gateway*.

Para análise de desempenho, consideramos a probabilidade de sucesso na recepção dos pacotes. Seguindo as formulações

utilizadas por [8], [9] e adicionando a elas o efeito do desvanecimento, temos que a probabilidade de receber pelo menos uma das H réplicas do cabeçalho é dada por

$$P_H = 1 - \left[1 - (1 - \mathcal{O}_\alpha) \left(1 - \frac{1}{C} \right)^{A_H - 1} \right]^H, \quad (3)$$

com

$$A_H = \max \{ 1, 2\lambda_H t_H + \lambda_F (t_H + t_F) \} \quad (4)$$

onde $\lambda_H = H\lambda M$ e $\lambda_F = F\lambda M$ representam as taxas de transmissão agregadas para cabeçalhos e fragmentos, respectivamente.

Para o *payload*, a probabilidade de sucesso na recepção de um fragmento individual é

$$P_F = (1 - \mathcal{O}_\alpha) \left(1 - \frac{1}{C} \right)^{A_F - 1}, \quad (5)$$

com

$$A_F = \max \{ 1, 2\lambda_F t_F + \lambda_H (t_H + t_F) \}. \quad (6)$$

Desta forma, já que a decodificação correta do *payload* requer pelo menos $\mu = \lceil F \cdot CR \rceil$ fragmentos, a probabilidade de sucesso para o *payload* é

$$P_\mu = 1 - \sum_{k=0}^{\mu-1} \binom{F}{k} P_F^k (1 - P_F)^{F-k}. \quad (7)$$

Finalmente, a probabilidade total de sucesso para um pacote completo é obtida por

$$P_S = P_H P_\mu. \quad (8)$$

Importante notar que para $\mathcal{O}_\alpha = 0$, *i.e.*, desconsiderando o efeito da probabilidade de *outage* devido ao desvanecimento, o equacionamento acima recai em [8], [9]. Portanto, a abordagem aqui apresentada funciona como uma generalização do modelo existente.

B. Desvanecimento

Os fenômenos de desvanecimento em comunicações sem fio classificam-se em duas categorias principais, o desvanecimento de larga escala, que descreve a atenuação gradual do sinal devido à distância e obstáculos físicos como edifícios ou vegetação, e o desvanecimento de pequena escala, que caracteriza as variações rápidas na amplitude e fase do sinal causadas por interferência entre múltiplos percursos de propagação. O desvanecimento de pequena escala é comumente modelado por distribuições probabilísticas que variam conforme as condições de propagação. Para cenários com componente dominante de linha de visada direta (*Line-of-Sight*, LOS) combinado com componentes multipercurso, utiliza-se a distribuição de Rician. Neste modelo, o parâmetro K (fator de Rician) quantifica a razão entre a potência do componente direto e a potência dos componentes espalhados. Alternativamente, a distribuição de Nakagami- m também proporciona uma flexibilidade de modelagem através do parâmetro de forma m , sendo capaz de representar desde condições severas de desvanecimento até cenários com componente LOS predominante [14], [16].

No contexto específico do LR-FHSS, a modelagem do desvanecimento é essencial pela transmissão sequencial dos

fragmentos de *payload* em diferentes canais de frequência ou submeter a condições independentes de desvanecimento, bem como pela robustez do esquema depender criticamente da recepção bem-sucedida de pelo menos uma réplica do cabeçalho. Esta característica torna o sistema particularmente sensível às flutuações rápidas de sinal típicas do desvanecimento de pequena escala. A seguir, apresenta-se a particularização da probabilidade de *outage* \mathcal{O}_α considerando os modelos de desvanecimento Nakagami- m e Rician.

1) *Distribuição Nakagami- m* : Para o caso em que o envelope do canal sem fio segue uma distribuição de Nakagami- m , denotada por $|h_{\text{Nakagami-}m}|$, a variável aleatória $N = |h_{\text{Nakagami-}m}|^2$ segue uma distribuição Gamma, de modo que a probabilidade de *outage* pode ser derivada analiticamente a partir da PDF (*Probability Density Function*) [11]

$$f_N(x) = \frac{m^m}{\Gamma(m)} x^{m-1} \exp(-mx), \quad (9)$$

onde $\Gamma(m) = \int_0^\infty t^{m-1} e^{-t} dt$ é a função Gamma completa e m é o parâmetro de forma da distribuição de Nakagami- m , em que quanto maior o m menor a severidade do desvanecimento.

Para uma rede com dispositivos uniformemente distribuídos, a probabilidade média de *outage* pode ser obtida integrando (9) sobre a distribuição espacial dos dispositivos. Considerando a densidade de probabilidade $f_d(r) = 1/D$ para $0 \leq r \leq D$, chegamos a

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{\text{Nakagami-}m} &= \int_0^D \int_0^{\frac{\varphi r^4}{\mathcal{P}_{t,i}}} f_N(x) f_d(r) dx dr \\ &= 1 - \frac{\Gamma(m, \psi)}{\Gamma(m)} - \frac{\Gamma(m + \frac{1}{4}) - \Gamma(m + \frac{1}{4}, \psi)}{\Gamma(m)^4 \sqrt[4]{\psi}}, \end{aligned} \quad (10)$$

em que $\Gamma(x, a) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_x^\infty t^{a-1} e^{-t} dt$ é a função Gamma superior incompleta e $\psi = mD^4 \varphi (\mathcal{P}_{t,i})^{-1}$. Importante ressaltar que a expressão obtida em (10) é uma contribuição desse trabalho.

2) *Distribuição Rician*: Já considerando que $R = |h|$ segue uma distribuição de Rician, temos sua PDF dada por [18]

$$f_R(x) = \frac{2x(K+1)}{\mathcal{P}_{t,i}/d_i^4} I_0 \left(2x \sqrt{\frac{K(K+1)}{\mathcal{P}_{t,i}/d_i^4}} \right) e^{-K - \frac{(K+1)x^2}{\mathcal{P}_{t,i}/d_i^4}}, \quad (11)$$

em que $I_0(a) = \sum_{k=0}^\infty \frac{(a^2/4)^k}{k! \Gamma(k+1)}$ é a função modificada de Bessel de primeiro tipo e ordem 0, e K representa a razão entre a potência da componente de LOS do canal e a componente de NLOS (*Non Line-of-Sight*).

Portanto, para uma rede com dispositivos uniformemente distribuídos com densidade $f_d(r) = 1/D$, $0 \leq r \leq D$, a probabilidade média de *outage* pode ser obtida como

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{\text{Rician}} &= \int_0^D \int_0^{\frac{\varphi d_i^4}{\mathcal{P}_{t,i}}} f_R(x) f_d(r) dx dr \\ &= 1 - \frac{1}{D} \int_0^D Q_1 \left(\sqrt{2K}, \sqrt{2(K+1) \frac{\varphi r^4}{\mathcal{P}_{t,i}}} \right) dr, \end{aligned} \quad (12)$$

TABELA I
CONFIGURAÇÕES DO LoRAWAN.

LoRaWAN	DR8	DR9
Réplicas do cabeçalho (H)	3	2
Code Rate (CR)	1/3	2/3

onde $Q_1(a, b) = \int_b^\infty x \exp\left(-\frac{x^2+a^2}{2}\right) I_0(ax) dx$ é a função Q de Marcum. Ainda, embora o resultado em (12) não possa ser obtido em forma fechada, a probabilidade média de *outage* pode ser facilmente resolvida por integração numérica.

C. Goodput

O *goodput*, \mathcal{G} , representa a taxa efetiva de transmissão de dados úteis, calculada como o número médio de *bytes* de *payload* recebidos com sucesso por segundo. Sua formulação é dada por

$$\mathcal{G} = P_S M \lambda L \quad [\text{bytes/s}], \quad (13)$$

onde P_S é a probabilidade de sucesso na recepção, M o número de dispositivos, λ a taxa de transmissão por dispositivo, e L o tamanho médio do *payload* em *bytes*.

III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Esta seção apresenta a análise de desempenho do protocolo LR-FHSS em cenários de desvanecimento, conduzida com o simulador de eventos discretos *LR-FHSS Sim* [15]. Desenvolvido no *framework* SciPy utilizando Python, o simulador foi estendido neste trabalho¹ para incorporar modelos de desvanecimento de canal, considerando as distribuições de Rician e Nakagami- m . Os parâmetros padrão adotados nas simulações foram $\mathcal{P}_{t,i} = 14$ dBm $\forall i$, $D = 2250$ m, $\lambda^{-1} = 900$ s, com duração total de simulação de 3600 s, $C = 35$, $L = 10$ bytes e $\varphi = -120$ dBm.² Adicionalmente, foram utilizadas as taxas de dados (*Data Rates*) DR8 e DR9 do LoRaWAN, conforme detalhado na Tabela I. Essas configurações, padronizadas pela regulamentação europeia [20], operam com uma largura de banda de canal de 137 kHz [6].

A Figura 1 mostra a probabilidade de sucesso na entrega de pacotes (P_S) em função do número de dispositivos (M), considerando três cenários com desvanecimento Rician, com $K = \{1, 4, 10\}$, e um cenário sem desvanecimento, para a taxa de dados DR8. Conforme esperado, os cenários com desvanecimento apresentam desempenho inferior ao caso sem desvanecimento. Observa-se ainda que, à medida que o parâmetro K aumenta, os resultados se aproximam progressivamente do cenário sem desvanecimento³. Esse comportamento

¹O código-fonte do simulador estendido está disponível em <https://github.com/misaelrc/LR-FHSS-sim>.

²Para este parâmetro, considerou-se o valor médio de sensibilidade do receptor para *transceivers* LR-FHSS conforme [19].

³As pequenas discrepâncias entre os resultados simulados e os modelos teóricos devem-se às simplificações no cálculo de P_S , que não considera correlações entre réplicas de cabeçalho e fragmentos de *payload*. Como demonstrado em [8], quando um fragmento de mensagem colide, a probabilidade de outros fragmentos da mesma mensagem colidirem aumenta significativamente, indicando transmissões concorrentes no mesmo intervalo de tempo.

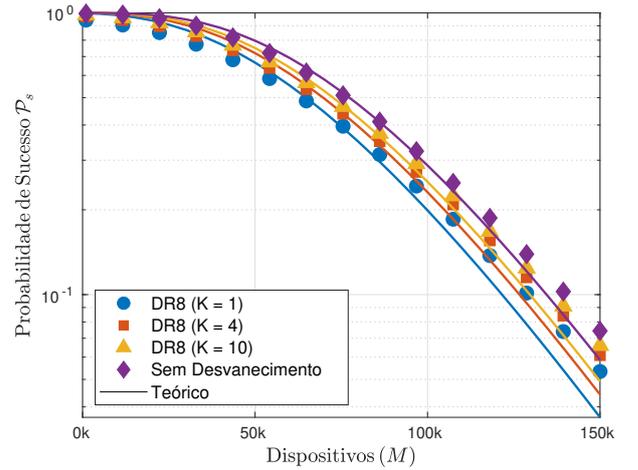


Fig. 1. Probabilidade de sucesso de pacotes (P_S) versus número de dispositivos (M) para DR8 sob desvanecimento Rician. Resultados comparam diferentes parâmetros $K = \{1, 4, 10\}$ e o caso sem desvanecimento.

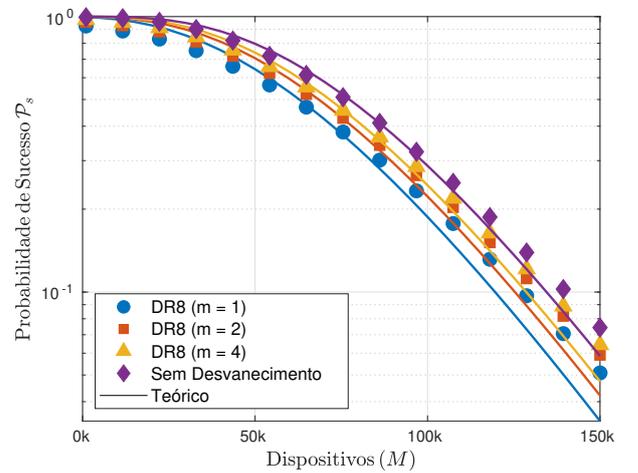


Fig. 2. Probabilidade de sucesso de pacotes (P_S) versus número de dispositivos (M) para DR8 sob desvanecimento Nakagami- m . Resultados comparam diferentes parâmetros $m = \{1, 2, 4\}$ e o caso sem desvanecimento.

destaca o papel crucial da componente de linha de visada na mitigação dos efeitos do desvanecimento, já que K representa a razão entre a potência do caminho direto e a potência das componentes espalhadas [18].

Na sequência, a Figura 2 apresenta P_S em função de M considerando cenários com desvanecimento Nakagami- m para parâmetros $m \in \{1, 2, 4\}$ e um cenário sem desvanecimento, utilizando a taxa de transmissão DR8. Observa-se uma degradação no desempenho nos casos com desvanecimento e, à medida que o parâmetro m aumenta, o desempenho aproxima-se progressivamente do cenário sem desvanecimento. Este comportamento está diretamente relacionado à função do parâmetro m na distribuição Nakagami- m , que controla a severidade do desvanecimento. Valores menores de m (próximos de 1) correspondem a canais com desvanecimento mais severo, enquanto valores maiores indicam condições de canal mais estáveis, aproximando-se de um canal livre de desvanecimento [16].

Por fim, as Figuras 3 e 4 apresentam o *goodput* em função

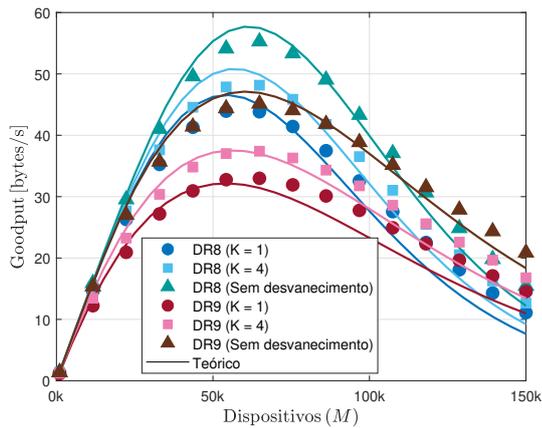


Fig. 3. Goodput versus número de dispositivos (M) para DR8 e DR9 sob desvanecimento Rician ($K \in \{1, 4\}$) e cenário sem desvanecimento.

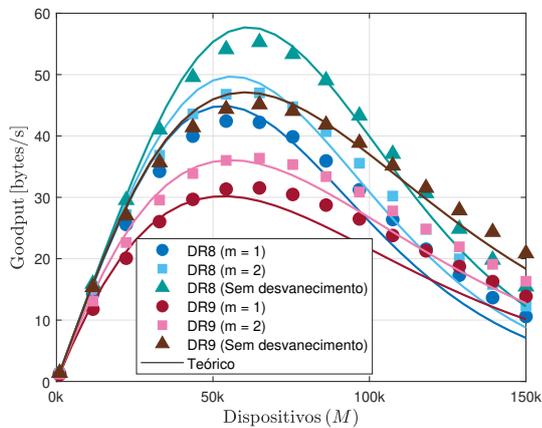


Fig. 4. Goodput versus número de dispositivos (M) para DR8 e DR9 sob desvanecimento Nakagami- m ($m \in \{1, 2\}$) e cenário sem desvanecimento.

de M para as taxas DR8 e DR9, considerando cenários com desvanecimento Rician ($K \in \{1, 4\}$), Nakagami- m ($m \in \{1, 2\}$) e sem desvanecimento. Os resultados demonstram consistência com as tendências observadas para P_S , exibindo degradação progressiva do desempenho para $M > 60.000$ dispositivos em todos os cenários. Nota-se que o desvanecimento tem impacto reduzido para redes com até 10.000 dispositivos ($M \leq 10.000$). À medida que os parâmetros K (Rician) ou m (Nakagami- m) aumentam, o *goodput* aproxima-se gradualmente do caso sem desvanecimento, com a taxa DR8 apresentando desempenho sistematicamente superior ao DR9 em todas as condições avaliadas.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho validou experimentalmente o impacto do desvanecimento no LR-FHSS, demonstrando que a severidade do desvanecimento afeta diretamente a probabilidade de sucesso e o *goodput*. Os resultados, obtidos através da extensão do simulador de [15] para incluir modelos Nakagami- m e Rician [14], [16], mostram consistência com os modelos teóricos, validando a abordagem proposta para dimensionamento de

redes IoT. Além disso, expressões teóricas para a probabilidade de *outage* média com distribuição espacial uniforme foram apresentadas para ambos os modelos de desvanecimento considerados. Esses resultados evidenciam a necessidade de desenvolvimento de técnicas para mitigação dos efeitos do desvanecimento em implementações práticas do LR-FHSS.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Al-Sarawi, M. Anbar, R. Abdullah, and A. B. Al Hawari, "Internet of Things Market Analysis Forecasts, 2020–2030," in *Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4)*, 2020, pp. 449–453.
- [2] *Internet of Things*, Ericsson Inc., 2024. [Online]. Available: {<https://www.ericsson.com/en/internet-of-things>}
- [3] K.-H. Ngo, G. Durisi, A. Graell i Amat, P. Popovski, A. E. Kallor, and B. Soret, "Unsourced Multiple Access With Common Alarm Messages: Network Slicing for Massive and Critical IoT," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 72, no. 2, pp. 907–923, 2024.
- [4] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60–67, 2016.
- [5] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, "Understanding the Limits of LoRaWAN," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34–40, 2017.
- [6] G. Boquet, P. Tuset-Peiró, F. Adelantado, T. Watteyne, and X. Vilajosana, "LR-FHSS: Overview and Performance Analysis," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 3, pp. 30–36, 2021.
- [7] D. N. Knop, J. L. Rebelatto, and R. D. Souza, "LR-FHSS With Network-Coded Header Replication," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 6, pp. 9066–9070, 2024.
- [8] J. M. de Souza Sant'Ana, O. d. S. Neto, A. Hoeller, J. L. Rebelatto, R. D. Souza, and H. Alves, "Asynchronous Contention Resolution-Aided ALOHA in LR-FHSS Networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 9, pp. 16 684–16 692, 2024.
- [9] M. A. Ullah, K. Mikhaylov, and H. Alves, "Analysis and Simulation of LoRaWAN LR-FHSS for Direct-to-Satellite Scenario," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 3, pp. 548–552, 2022.
- [10] F. Zhang, F. Yu, X. Zheng, L. Liu, and H. Ma, "DFH: Improving the Reliability of LR-FHSS via Dynamic Frequency Hopping," in *IEEE 31st International Conference on Network Protocols (ICNP)*, 2023, pp. 1–12.
- [11] A. Maleki, H. H. Nguyen, and R. Barton, "Outage Probability Analysis of LR-FHSS in Satellite IoT Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 27, no. 3, pp. 946–950, 2023.
- [12] A. Maleki, H. H. Nguyen, E. Bedeer, and R. Barton, "Outage Probability Analysis of LR-FHSS and D2D-Aided LR-FHSS Protocols in Shadowed-Rice Fading Direct-to-Satellite IoT Networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 11 101–11 116, 2024.
- [13] E. Testi and E. Paolini, "Packet Collision Probability of Direct-to-Satellite IoT Systems," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 1843–1855, 2025.
- [14] B. Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems. I. Characterization," *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 7, pp. 90–100, 1997.
- [15] J. M. de Souza Sant'Ana, A. Hoeller, H. Alves, and R. D. Souza, "LR-FHSS-Sim: A Discrete-Event Simulator for LR-FHSS Networks," in *Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit*, 2024, pp. 700–705.
- [16] A. Sharma and R. C. Singh Chauhan, "Evaluating the BER Performance for M-ary QAM in AWGN, Rayleigh, Rician, and Nakagami-m Fading Channels," in *14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 2023, pp. 1–6.
- [17] K.-R. Koch, *Introduction to Bayesian Statistics*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, Jul. 2007.
- [18] M. D. Yacoub, "The κ - μ Distribution and the η - μ Distribution," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 49, no. 1, pp. 68–81, 2007.
- [19] *LR1121 Transceiver - User Manual*, Semtech Corp., 2023, Rev. 2.0. [Online]. Available: {<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/lr1121#documentation>}
- [20] *LoRa Alliance Technical Committee Regional Parameters Workgroup, Version 1.0.4 and Regional Parameters RP002*, LoRa Alliance, Sept. 2022. [Online]. Available: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>