

Detecção de Colisões e Priorização no Acesso Aleatório mMTC Inteligentes em Redes Celulares IoT

Giancarlo Maldonado Cárdenas¹, Carlos A. Astudillo Trujillo¹, Nelson L. S. da Fonseca¹

¹ Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Campinas – SP – Brasil

g262946@dac.unicamp.br, castudillo@unicamp.br, nfonseca@ic.unicamp.br

Abstract. *The growth of Internet of Things (IoT) applications in massive machine-type communications (mMTC) scenarios poses significant challenges to random access procedures in cellular networks. In particular, the high incidence of collisions in the random access channel (PRACH) compromises system efficiency, resulting in increased access latency and the number of retransmissions. This work proposes an integrated approach for explicit collision detection based on machine learning, combined with collision-aware prioritisation policies in the random access procedure. The proposed model is trained using simulated data and optimised for execution in edge environments through quantisation techniques. Experimental evaluations in mMTC scenarios with up to 30,000 simultaneous devices demonstrate significant reductions in access latency and the average number of retransmissions, highlighting the approach's potential for high-density cellular IoT networks.*

Resumo. *O crescimento de aplicações de Internet das Coisas (IoT) em cenários de comunicações massivas do tipo machine-type communications (mMTC) impõe desafios significativos aos procedimentos de acesso aleatório em redes celulares. Em particular, a elevada ocorrência de colisões no canal de acesso aleatório (PRACH) compromete a eficiência do sistema, resultando em aumento da latência de acesso e no número de retransmissões. Este trabalho propõe uma abordagem integrada para detecção explícita de colisões baseada em aprendizado de máquina, combinada com políticas de priorização conscientes de colisão no procedimento de acesso aleatório. O modelo proposto é treinado a partir de dados simulados e otimizado para execução em ambientes de borda por meio de técnicas de quantização. Avaliações experimentais em cenários mMTC com até 30 mil dispositivos simultâneos demonstram reduções significativas na latência de acesso e no número médio de retransmissões, evidenciando o potencial da abordagem para redes celulares IoT de alta densidade.*

1. Introdução

A rápida expansão da IoT tem criado cenários de mMTC em que milhares e potencialmente dezenas de milhares de dispositivos concorrentes precisam acessar a rede celular simultaneamente. Aplicações críticas em transporte, saúde e automação industrial [Althumali and Othman 2018, Dudhe et al. 2017, Linkous et al. 2019] dependem dessa conectividade em larga escala, mas a escalabilidade dos procedimentos de acesso inicial permanece um gargalo. O procedimento de acesso aleatório (RAP), em especial o

Physical Random Access Channel (PRACH), apresenta elevada taxa de colisões em ambientes densos [Mahbub and Barua 2021, Narayanan et al. 2018], o que provoca múltiplas retransmissões, aumento substancial da latência de acesso e uso ineficiente dos recursos de rádio. Esses efeitos comprometem não apenas a qualidade de serviço, mas também a viabilidade de aplicações que exigem acesso rápido e previsível em larga escala.

As soluções tradicionais baseadas em correlação, alocação estática de recursos ou heurísticas de escalonamento demonstram limitações quando aplicadas a esses cenários, pois muitas exigem alterações na camada física, presumem nodos estacionários ou apresentam complexidade computacional impraticável em escala. Nesse contexto, métodos que combinem robustez prática, baixo custo de implantação e capacidade de generalização para diferentes condições de canal são essenciais para viabilizar a próxima geração de redes IoT massivas.

Este trabalho propõe uma abordagem prática e replicável para mitigar colisões no RAP. Introduzimos um detector de colisões baseado em rede neural treinada com dados simulados utilizando *MATLAB LTE System Toolbox*, além de técnicas de quantização, incluindo *Dynamic Range Quantization* e *Full Integer Quantization*, para viabilizar inferência em ambientes de borda. Também propomos dois algoritmos de priorização, TTCRA e STCRA, que integram a saída do detector ao processo de alocação durante o RAP.

A solução foi avaliada experimentalmente em cenários realistas de mMTC, com estudos de caso de até 30 000 dispositivos simultâneos, mostrando reduções significativas na latência de acesso e no número médio de retransmissões. Para promover reprodutibilidade e investigação futura, geramos e publicamos o conjunto de dados utilizado (Collision Detection Dataset in Time Windows BIN — Zenodo, DOI: <https://zenodo.org/records/15857680>). Além disso, os resultados foram materializados em publicações científicas derivadas da dissertação.

Ao contrário de propostas que exigem mudanças no equipamento do usuário ou que dependem de hipóteses restritivas, nossa solução é compatível com a infraestrutura celular padronizada e foi projetada para escalabilidade e implantação prática. A contribuição central deste trabalho é demonstrar que a detecção explícita de colisões, combinada com políticas de priorização informadas por ML e otimizações de inferência, constitui uma estratégia eficaz e implementável para melhorar o desempenho do acesso aleatório em redes celulares IoT de alta densidade. Além disso, são discutidos os desafios práticos de implementação, incluindo custos computacionais e trade-offs de inferência em ambientes mMTC.

2. Caracterização do problema

No procedimento de acesso aleatório das redes celulares, múltiplos dispositivos podem selecionar o mesmo preâmbulo PRACH, resultando em colisões que não são explicitamente detectadas pela estação base nas fases iniciais do processo. Como consequência, o sistema trata transmissões colididas e não colididas de forma equivalente, desperdiçando oportunidades de priorização e adaptação dinâmica.

Trabalhos existentes propõem mecanismos estatísticos, analíticos ou heurísticos para mitigar colisões no acesso aleatório, mas frequentemente apresentam limitações

de precisão e escalabilidade em cenários mMTC densos [Althumali and Othman 2018, Wei et al. 2015, Liang et al. 2017, Wang et al. 2020]. Além disso, muitas abordagens não integram explicitamente a detecção de colisões a políticas de priorização no acesso aleatório, limitando sua efetividade em condições de alta competição por recursos no RAP [De Andrade et al. 2017, Astudillo et al. 2017a, Astudillo et al. 2017b, Jang et al. 2021].

3. Objetivos e contribuições

O objetivo principal deste trabalho é aumentar a eficiência do acesso aleatório em cenários mMTC por meio de uma abordagem integrada e de ponta a ponta (end-to-end), que combina detecção explícita de colisões baseada em aprendizado de máquina com políticas de priorização de recursos no procedimento de acesso aleatório. Diferentemente de trabalhos existentes, a proposta não requer modificações na infraestrutura *Cellular Internet of Things* (CIoT) padronizada e opera diretamente sobre dados representativos do canal, permitindo sua aplicação prática em redes reais.

As principais contribuições são:

- Proposição de um mecanismo de detecção de colisões no PRACH baseado em aprendizado de máquina, utilizando características extraídas do sinal recebido.
- Avaliação comparativa de múltiplos classificadores, com seleção de uma rede neural como modelo final.
- Aplicação de técnicas de quantização para viabilizar a inferência do modelo em ambientes de borda com restrições computacionais.
- Desenvolvimento de duas políticas de priorização conscientes de colisão, denominadas TTCRA e STCRA, que integram a informação de colisão ao processo de alocação de recursos.
- Avaliação extensiva do impacto das propostas em cenários mMTC realistas, considerando até 30 mil dispositivos simultâneos e múltiplas métricas de desempenho.

4. Trabalhos relacionados

A detecção e mitigação de colisões no RAP em redes celulares IoT/mMTC têm sido abordadas por três linhas principais: (i) mecanismos de detecção e resolução de colisões na etapa de preâmbulo; (ii) políticas de alocação de recursos e escalonamento de sinalização de controle; e (iii) abordagens baseadas em aprendizado de máquina (ML) para inferir colisões e sua multiplicidade.

4.1. Detecção e resolução de colisões no preâmbulo

Diversos trabalhos buscam antecipar a identificação de eventos de colisão ainda no primeiro estágio do RAP, reduzindo desperdício de recursos e latência. O esquema e-PACD utiliza preâmbulos rotulados com sequências Zadoff-Chu adicionais para detectar colisões precocemente e evitar alocações inúteis no *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH) [Jang et al. 2017]. De forma semelhante, a proposta PACR explora preâmbulos rotulados e múltiplos valores de *Timing Advance* (TA) para distinguir Equipamentos de Usuário (UEs) que selecionam o mesmo preâmbulo [Jang et al. 2018]. Outra linha utiliza acesso aleatório não ortogonal (NORA), explorando diferenças de *Time of Arrival* (ToA) e *Successive Interference Cancellation* (SIC) para separar transmissões concorrentes, elevando a taxa de sucesso e o throughput em relação ao acesso ortogonal tradicional [Liang et al. 2017, Wang et al. 2020].

4.2. Alocação de recursos e sinalização de controle

Em cenários mMTC, não basta detectar colisões: é necessário transformar essa informação em decisões de alocação e escalonamento que reduzam bloqueios e atrasos. O NORS combina a classificação do estado do preâmbulo (inativo, sem colisão, colidido) com agendamento não ortogonal, alocando recursos apenas quando há perspectiva de avanço do RAP [Jang et al. 2024]. Em paralelo, algoritmos de alocação de recursos no *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH) cientes da prioridade do preâmbulo (PPA) reduzem atrasos de respostas *Random Access Response* (RAR) para grupos prioritários [Astudillo et al. 2017a], enquanto o ePPA amplia o isolamento entre perfis *Human-Type Communications* (HTC) e *Machine-Type Communications* (MTC) em tráfego massivo, ainda condicionado ao gargalo do canal de controle [Astudillo et al. 2017b, De Andrade et al. 2017].

4.3. Aprendizado de máquina para detecção de colisões

Mais recentemente, ML tem sido empregado para substituir ou complementar métodos baseados em correlação, explorando padrões em amostras físicas e estatísticas do receptor. Um *framework* baseado em aprendizado profundo propõe classificadores em duas etapas (preâmbulo e TA) para identificar colisões e apoiar a alocação eficiente no PUSCH [Jang et al. 2021]. Complementarmente, há propostas que estimam a multiplicidade de colisões no RACH via ML, inferindo quantos UEs escolheram o mesmo preâmbulo [Magrin et al. 2019]. Também existem abordagens que utilizam características de camada física, incluindo sinais brutos, para detecção passiva de colisões já no primeiro estágio do RAP, sem exigir mudanças no protocolo do UE [Yin et al. 2023]. No entanto, tais abordagens frequentemente não exploram de forma integrada a informação de colisão no processo de tomada de decisão no nível do sistema.

4.4. Lacunas e diferencial desta proposta

Apesar dos avanços, muitas soluções clássicas dependem de hipóteses restritivas, como a suposição de dispositivos estacionários, ou implicam sobrecarga e mudanças na camada física [Ko et al. 2012, Zhang et al. 2015, Jang et al. 2018]. Abordagens NORA e variantes baseadas em SIC tendem a ser sensíveis às condições de canal e à capacidade de separação em tempo real, podendo degradar em cenários densos [Liang et al. 2017, Wang et al. 2020, Bai et al. 2020]. Já abordagens baseadas em ML frequentemente enfrentam desafios de generalização e dependem de dados rotulados representativos do ambiente operacional [Jang et al. 2021, Magrin et al. 2019, Yin et al. 2023].

Neste contexto, a proposta deste trabalho se diferencia de forma clara das abordagens existentes por: (i) realizar detecção de colisões com dados gerados sob múltiplas condições de canal e mobilidade, por janela temporal, favorecendo generalização; (ii) integrar a saída do detector a políticas de priorização representadas por TTCRA e STCRA no nível sistêmico, mitigando colisões e bloqueios ao longo do RAP; e (iii) manter compatibilidade com redes CIoT padronizadas, evitando mudanças estruturais no UE e preservando escalabilidade em cenários mMTC de alta densidade.

Diferentemente de trabalhos anteriores, que tratam detecção de colisões e alocação de recursos de forma isolada, nossa proposta estabelece uma solução integrada e de ponta a ponta (end-to-end), na qual a detecção de colisões e a decisão de alocação de recursos são acopladas em um único pipeline operacional. Além disso, o modelo proposto

opera diretamente sobre dados representativos do canal, sem depender de informações adicionais de sinalização, o que reforça sua aplicabilidade em cenários reais. Em conjunto, essas características tornam a proposta uma abordagem prática, integrada e não incremental para o tratamento de colisões em ambientes mMTC de alta densidade.

5. Metodologia

O conjunto de dados utilizado para treinamento e avaliação do modelo de detecção foi gerado por meio de simulações integrando o LTE-Sim estendido e o *MATLAB LTE System Toolbox* para geração e processamento dos dados. Foram considerados diferentes cenários de densidade de usuários, perfis de canal e condições de mobilidade, permitindo a construção de um conjunto de dados representativo de ambientes mMTC.

A Figura 1 apresenta uma visão geral do pipeline da solução proposta, desde a geração de dados e o treinamento do modelo de detecção de colisões até sua quantização e integração com políticas de priorização no procedimento de acesso aleatório.

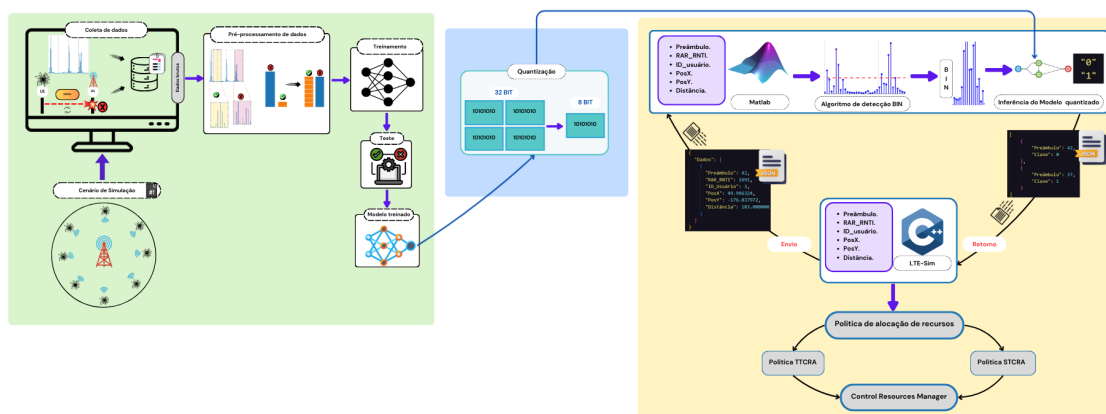


Figura 1. Pipeline da solução proposta, destacando as etapas de geração de dados, treinamento e quantização do modelo de detecção de colisões, bem como sua integração com as políticas de priorização TTCRA e STCRA no acesso aleatório.

Foram avaliados diversos classificadores, incluindo regressão logística, máquinas de vetor de suporte, florestas aleatórias e redes neurais. A rede neural apresentou o melhor compromisso entre desempenho de classificação e custo computacional, sendo selecionada como modelo final para integração ao sistema.

5.1. Quantização do modelo

Para viabilizar a execução eficiente do detector de colisões em ambientes de borda, foram aplicadas técnicas de quantização em ponto fixo, reduzindo significativamente o tamanho do modelo e o tempo de inferência, como evidenciado na Figura 2, sem impacto relevante na acurácia da classificação. Esse resultado reforça a viabilidade prática da solução em cenários com restrições computacionais.

6. Acesso aleatório ciente de colisão

Com base na informação fornecida pelo detector de colisões, foram propostas duas políticas de priorização que caracterizam um mecanismo de acesso aleatório ciente de

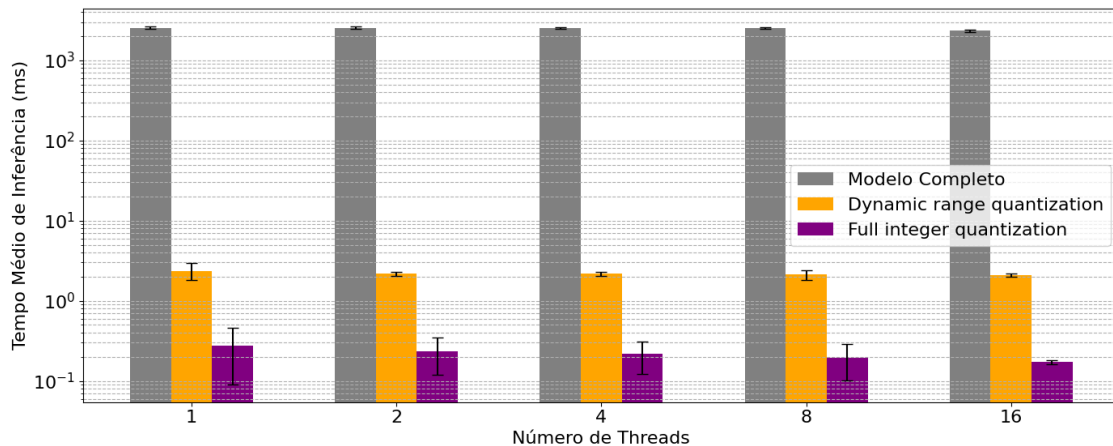


Figura 2. Tempo médio de inferência.

colisão. A política TTCRA foca no aproveitamento total da rede, priorizando mensagens sem colisão e utilizando recursos ociosos para processar preâmbulos colididos, enquanto a STCRA prioriza a latência mínima, processando exclusivamente mensagens sem colisão e descartando as colididas para eliminar sobrecargas e garantir rapidez ao tráfego crítico.

Diferentemente de abordagens tradicionais, que tratam o acesso aleatório sem explorar explicitamente a ocorrência de colisões, as políticas propostas utilizam diretamente essa informação para orientar a alocação de recursos, permitindo decisões mais informadas e adaptativas. Ambas as políticas foram integradas ao simulador LTE-Sim estendido e aplicadas durante as transmissões do acesso aleatório, com o objetivo de reduzir a latência de acesso e o número de retransmissões em cenários de alta densidade. Os efeitos dessas políticas são analisados experimentalmente na seção a seguir.

7. Resultados experimentais

Os resultados experimentais demonstram que as políticas propostas reduzem de forma consistente o número médio de retransmissões de preâmbulos e a latência de acesso, com ganhos mais expressivos em cenários mMTC de alta densidade. Em comparação com o mecanismo base, observam-se melhorias significativas nos percentis de latência e redução da probabilidade de colisão.

A qualidade do modelo de detecção de colisões foi avaliada por meio de métricas de classificação, evidenciando elevada capacidade de distinção entre transmissões colididas e não colididas, conforme ilustrado na Figura 3. Esse desempenho constitui a base para a efetividade das políticas de priorização propostas.

Ao integrar a informação de colisão ao procedimento de acesso aleatório, observam-se ganhos expressivos de desempenho. A Tabela 1 resume os resultados obtidos para o mecanismo base e para as políticas propostas, evidenciando reduções consistentes na latência de acesso e no número médio de transmissões, especialmente em cenários de maior densidade.

Destaca-se que os maiores ganhos são observados nos cenários com 10k e 30k dispositivos, nos quais as políticas propostas reduzem substancialmente o retardo e o

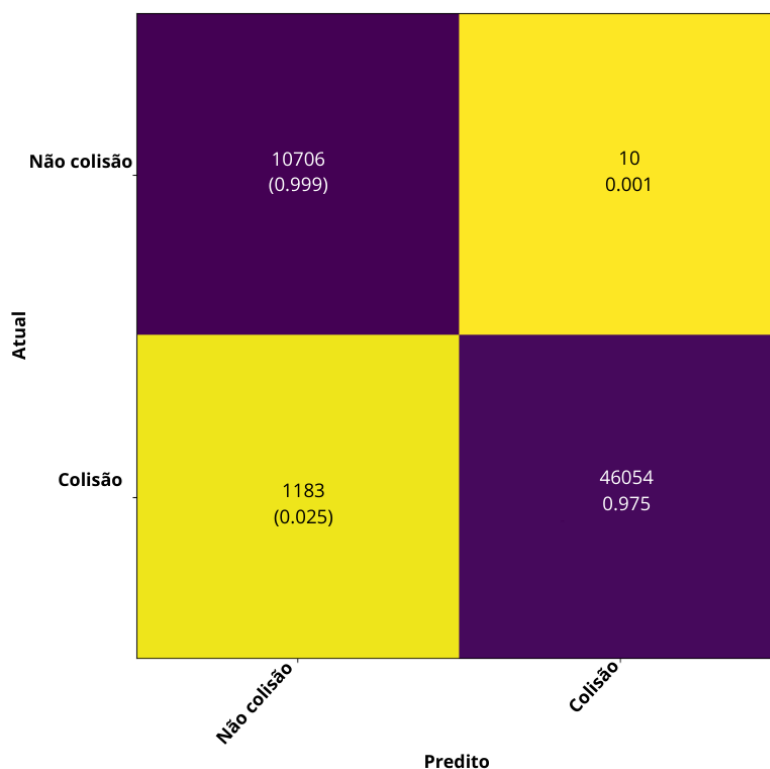


Figura 3. Matriz de confusão do modelo de detecção de colisões selecionado, evidenciando alta acurácia e baixo índice de erros de classificação.

Métricas	Base			TTCRA			STCRA		
	5k	10k	30k	5k	10k	30k	5k	10k	30k
Probabilidade de Sucesso no Acesso	100%	81.70%	10.43%	100%	100%	30.33%	100%	100%	31.88%
Retardo no Acesso Aleatório (ms)	20.90	60.05	84.71	21.14	28.86	87.49	18.59	21.72	80.36
Retardo de acesso do 10º percentil (ms)	16	16	17	16	16	17	16	16	17
Retardo de acesso do 90º percentil (ms)	24.2	174.8	245	24	76	197	24	36	178.67
Número médio de transmissões do preâmbulo	1.06	2.07	2.84	1.06	1.17	3.71	1.07	1.17	3.78
Probabilidade de colisão do preâmbulo	2.87%	23.02%	20.60%	3.00%	7.27%	20.70%	3.07%	7.16%	20.51%
Probabilidade de bloqueio da Msg2	0%	59.13%	92.06%	0%	0.41%	91.38%	0%	0%	8.17%

Tabela 1. Desempenho do acesso aleatório com diferentes políticas de priorização para mMTC.

número de retransmissões. Esses resultados evidenciam que a integração entre detecção de colisões e políticas de priorização não apenas melhora métricas isoladas, mas altera de forma significativa o comportamento do procedimento de acesso aleatório, demonstrando o benefício de uma abordagem integrada em comparação com soluções tradicionais que tratam esses aspectos de forma independente.

8. Limitações e desafios de implementação

Apesar dos resultados promissores, a solução proposta apresenta algumas limitações que devem ser consideradas em cenários de implementação prática. Em particular, a execução do modelo de aprendizado de máquina a cada tentativa de acesso implica um custo computacional adicional na estação base, o que pode impactar o consumo energético e a escalabilidade do sistema em cenários de altíssima densidade.

Esse aspecto introduz um trade-off entre o ganho obtido com a redução no número de retransmissões e o custo associado à inferência do modelo. No entanto, os resultados obtidos indicam que a aplicação de técnicas de quantização reduz significativamente o tempo de inferência, tornando a abordagem viável para execução em ambientes com restrições computacionais.

Além disso, a solução foi avaliada em ambientes simulados, o que, embora permita o controle de variáveis e a reprodução de cenários mMTC em larga escala, pode não capturar integralmente todas as variações presentes em redes reais. Dessa forma, a validação em testbeds reais constitui um passo importante como trabalho futuro.

Mesmo com essas limitações, a proposta demonstra ser uma alternativa prática e escalável para mitigar colisões no acesso aleatório, mantendo compatibilidade com infraestruturas celulares existentes, sem comprometer os ganhos obtidos em desempenho.

9. Impacto científico e tecnológico

As contribuições deste trabalho apresentam elevado potencial de impacto em redes celulares IoT, especialmente em cenários mMTC em 5G, 6G e IoT industrial. A integração de detecção explícita de colisões baseada em aprendizado de máquina com políticas de priorização no acesso aleatório abre caminho para mecanismos mais adaptativos e eficientes, podendo influenciar futuras evoluções de técnicas de acesso em redes celulares de próxima geração. Além disso, ao demonstrar a viabilidade de uma abordagem integrada e implementável, este trabalho contribui para aproximar soluções baseadas em aprendizado de máquina da operação prática de sistemas celulares.

10. Conclusões

Este trabalho apresentou uma abordagem integrada para o tratamento de colisões no acesso aleatório em cenários mMTC, combinando detecção explícita de colisões baseada em aprendizado de máquina com políticas de priorização de recursos no nível do sistema. Os resultados obtidos, validados experimentalmente em cenários de alta densidade, demonstram não apenas melhorias significativas em métricas de desempenho, como latência e número de retransmissões, mas também evidenciam o impacto da integração entre detecção e decisão na operação do procedimento de acesso aleatório.

Além disso, a proposta se destaca por sua aplicabilidade prática, uma vez que não requer modificações na infraestrutura CIoT padronizada e incorpora técnicas de quantização que viabilizam sua execução em ambientes com restrições computacionais. Esses aspectos reforçam o potencial da abordagem como uma solução eficiente, escalável e aplicável em redes celulares IoT de larga escala.

Referências

- Althumali, H. and Othman, M. (2018). A survey of random access control techniques for machine-to-machine communications in lte/lte-a networks. *IEEE Access*, 6:74961–74983.
- Astudillo, C. A., de Andrade, T. P. C., and da Fonseca, N. L. S. (2017a). Allocation of control resources with preamble priority awareness for human and machine type communications in lte-advanced networks. In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6.

- Astudillo, C. A., de Andrade, T. P. C., and da Fonseca, N. L. S. (2017b). Impact of preamble-priority-aware downlink control signaling scheduling on lte/lte-a network performance. In *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pages 1–5.
- Bai, L., Han, R., Liu, J., Choi, J., and Zhang, W. (2020). Multiple delay estimation for collision resolution in non-orthogonal random access. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(1):497–508.
- De Andrade, T. P., Astudillo, C. A., Sekijima, L. R., and Da Fonseca, N. L. (2017). The random access procedure in long term evolution networks for the internet of things. *IEEE Communications Magazine*, 55(3):124–131.
- Dudhe, P., Kadam, N., Hushangabade, R. M., and Deshmukh, M. S. (2017). Internet of things (iot): An overview and its applications. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, pages 2650–2653.
- Jang, H. S., Kim, S. M., Park, H.-S., and Sung, D. K. (2017). An early preamble collision detection scheme based on tagged preambles for cellular m2m random access. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(7):5974–5984.
- Jang, H. S., Kim, S. M., Park, H.-S., and Sung, D. K. (2018). A preamble collision resolution scheme via tagged preambles for cellular iot/m2m communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(2):1825–1829.
- Jang, H. S., Lee, H., Quek, T. Q. S., and Shin, H. (2021). Deep learning-based cellular random access framework. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(11):7503–7518.
- Jang, H. S., Yun, M., Kim, T., and Bang, I. (2024). Non-orthogonal resource scheduling with enhanced preamble detection method for cellular random access networks. *ICT Express*.
- Ko, K. S., Kim, M. J., Bae, K. Y., Sung, D. K., Kim, J. H., and Ahn, J. Y. (2012). A novel random access for fixed-location machine-to-machine communications in ofdma based systems. *IEEE Communications Letters*, 16(9):1428–1431.
- Liang, Y., Li, X., Zhang, J., and Ding, Z. (2017). Non-orthogonal random access (nora) for 5g networks.
- Linkous, L., Zohrabi, N., and Abdelwahed, S. (2019). Health monitoring in smart homes utilizing internet of things. In *2019 IEEE/ACM International Conference on Connected Health: Applications, Systems and Engineering Technologies (CHASE)*, pages 29–34.
- Magrin, D., Pielli, C., Stefanović, , and Zorzi, M. (2019). Enabling lte rach collision multiplicity detection via machine learning. In *2019 International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOPT)*, pages 1–8.
- Mahbub, M. and Barua, B. (2021). Optimal radio resource allocation in small cells for a massive iot network: An mmhc perspective. In *2021 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, pages 01–04.

- Narayanan, S., Tsolkas, D., Passas, N., and Merakos, L. (2018). Nb-iot: A candidate technology for massive iot in the 5g era. In *2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, pages 1–6.
- Wang, Y., Wang, T., Yang, Z., Wang, D., and Cheng, J. (2020). Throughput-oriented non-orthogonal random access scheme for massive mtc networks. *IEEE Transactions on Communications*, 68(3):1777–1793.
- Wei, C., Bianchi, G., and Cheng, R. (2015). Modeling and analysis of random access channels with bursty arrivals in ofdma wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(4):1940–1953.
- Yin, Y., Zhao, D., Li, X., and Zeng, S. (2023). Learning based preamble collision detection of cellular random access by physical layer features. In *2023 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA)*, pages 28–33, Los Alamitos, CA, USA. IEEE Computer Society.
- Zhang, N., Kang, G., Wang, J., Guo, Y., and Labeau, F. (2015). Resource allocation in a new random access for m2m communications. *IEEE Communications Letters*, 19(5):843–846.