

Procedimento de Acesso Aleatório em Redes 5G/6G Integradas com Satélites de Órbita Terrestre Baixa

Eduardo Mosca¹, Tiago P. C. de Andrade¹, Rafael Pereira²,
Arthur Barata¹, Carlos A. Astudillo¹

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

²Universidade de Fortaleza (UNIFOR)
Fortaleza – CE – Brazil

{eduardomosca, tiagoandrade, arthurb}@lrc.ic.unicamp.br,
rafaell_b.p@edu.unifor.br e castudillo@unicamp.br

Abstract. In the context of mobile networks, low earth orbit (LEO) satellites can operate in various capacities, enabling the extension of coverage to remote or hard-to-reach areas where the deployment of terrestrial infrastructure is impractical. Additionally, due to their ability to provide low-latency and high-throughput communication, LEO satellites complement terrestrial networks by enhancing connectivity for moving vehicles, such as airplanes and ships, or by delivering critical emergency services in disaster-affected areas. However, few studies in the literature focus on linking existing LEO satellite technologies with mobile networks like 5G and 6G. Therefore, this article explores the use of random access techniques in LEO satellites to demonstrate advancements that enable the integration of this technology into 5G and 6G networks.

Resumo. No contexto das redes móveis, os satélites de órbita terrestre baixa (Low Earth Orbit - LEO) podem funcionar em várias capacidades, sendo possível estender a cobertura da rede terrestre para áreas remotas ou de difícil acesso, onde a implantação de infraestrutura terrestre é impraticável. Além disso, devido à sua capacidade de fornecer comunicação de baixa latência e alto rendimento, os satélites LEO complementam as redes terrestres ao melhorar a conectividade para veículos em movimento, como aviões e navios, ou oferecem serviços de emergência críticos em áreas afetadas por desastres. No entanto, são poucos os trabalhos na literatura que focam em relacionar as tecnologias existentes em satélites LEO com redes móveis como o 5G e o 6G. Portanto, este trabalho explora o uso de técnicas de acesso aleatório em satélites LEO, de forma a demonstrar os avanços para habilitar o uso desta tecnologia em redes 5G e 6G.

Keywords— Random Access, LEO Satelite, 6G, 5G

1. Introdução

A rápida evolução das redes de quinta geração (5G) impulsionou o desenvolvimento de aplicações avançadas, como a Internet Industrial das Coisas (*Industrial Internet of Things - IIoT*), comunicação holográfica, gêmeos digitais (*digital twins*) e o metaverso [Cui et al. 2022], intensificando a pesquisa e o desenvolvimento na indústria e academia para a transição para a sexta geração (6G), que promete superar as limitações do 5G e habilitar novas fronteiras da conectividade [Kodheli et al. 2021]. A transição para o 6G, que visa uma conectividade ubíqua e massiva, elevando os padrões de capacidade e confiabilidade para impulsionar a "Internet de Tudo" através da convergência de comunicações, sensoriamento, geolocalização, computação e controle, demanda a superação de complexos desafios técnicos e a integração de tecnologias complementares, como redes não terrestres, para otimizar um ambiente de conectividade cada vez mais intrincado.

As Redes Não-Terrestres (*Non-terrestrial Networks - NTN*) representam uma solução promissora para expandir a conectividade em áreas com infraestrutura terrestre limitada [Kodheli et al. 2021, Lin and Lee 2021]. A rápida evolução das comunicações via satélite impulsiona a integração de redes espaciais ao 5G e principalmente ao 6G [Kodheli et al. 2021], onde

satélites de Órbita Terrestre Baixa (*Low Earth Orbit* - LEO) se destacam pela baixa latência, custo reduzido e cobertura dinâmica, complementando as redes 5G e 6G para aplicações que demandam conectividade global e confiável [Lin and Lee 2021]. Operando em altitudes de 160 km a 2.000 km e com velocidades de aproximadamente 7,2 km/s, os satélites LEO oferecem latência significativamente menor que os satélites geoestacionários (*Geostationary Earth Orbit* - GEO) [Kodheli et al. 2021], além de custos de implantação reduzidos, tornando-os ideais para integrar redes 5G e 6G [Lin and Lee 2021], expandir a conectividade e habilitar comunicações em tempo real.

No contexto das redes 5G e 6G, a integração de satélites LEO como estações base, formando uma Rede de Acesso via Satélite de Órbita Terrestre Baixa (*Low Earth Orbit Satellite Access Network* - LEO-SAN), surge como uma estratégia promissora para complementar as redes terrestres por fornecer cobertura ubíqua, acesso massivo contínuo e qualidade de sinal superior, especialmente em aplicações que demandam baixa latência e alta confiabilidade, como vídeo de alta definição, realidade aumentada e redes CIoT com cobertura global e conectividade constante.

A integração 5G/6G LEO-SAN, embora promissora, introduz complexidades adicionais aos desafios já existentes nas redes terrestres. As LEO-SANs enfrentam obstáculos desde sua alta velocidade de movimento, latências de transmissão prolongadas e processos de *handshake* ineficientes, tornando as técnicas tradicionais de acesso aleatório (*Random Access* - RA) inadequadas. O acesso aleatório, especialmente em cenários de comunicação massiva do tipo máquina (*Massive Machine Type Communication* - MTC) e IoT de baixa taxa de dados, é comprometido pela sobrecarga de sinalização e pela necessidade de adaptação rápida às topologias dinâmicas, além do aumento da latência devido aos longos atrasos de ida e volta (*Round Trip Time* - RTT) entre satélites e estações terrestres [Saarnisaari et al. 2019].

Embora os desafios que ainda precisam ser abordados, a LEO-SAN apresenta uma solução promissora para preencher lacunas de conectividade em regiões remotas e melhorar a densidade de rede em áreas urbanas congestionadas [Lin and Lee 2021]. Portanto, este trabalho busca detalhar os tipos de conectividade via satélite de forma a consolidar o conhecimento disponível em conectividade LEO-SAN em ambientes IoT através das redes 5G e 6G.

A organização deste trabalho é dada como segue: a Seção 2 descreve as principais técnicas de acesso múltiplo utilizadas nas redes 5G/6G; a Seção 3 descreve as principais técnicas utilizadas para o RA em redes 5G/6G; a Seção 4 descreve as principais tecnologias padronizadas para as redes 5G Satelitais; a Seção 5 apresenta os principais desafios na implantação de Satélites LEO em redes 5G/6G; a Seção 6 apresenta as principais tendências para as redes 5G/6G incorporadas em Satélites LEO; e, finalmente, a Seção 7 apresenta as considerações finais do trabalho.

2. Técnicas de Acesso Múltiplo para Redes LEO-SAN

Acesso múltiplo é uma técnica que permite que vários usuários compartilhem simultaneamente um mesmo recurso de comunicação. Essa técnica é fundamental para o funcionamento de redes de comunicação, pois permite que um grande número de dispositivos realize a comunicação de forma eficiente em um meio compartilhado. Nesta seção serão apresentadas as técnicas de acesso múltiplo encontradas em redes LEO-SAN, nomeadamente, acesso múltiplo ortogonal, espacial e não ortogonal.

O Acesso Múltiplo Ortogonal (*Orthogonal Multiple Access* - OMA) é uma técnica que atribui recursos ortogonais (não sobrepostos) a diferentes dispositivos. Isso significa que cada dispositivo utiliza um conjunto de recursos exclusivo, evitando interferências e colisões. As principais técnicas utilizadas aqui são o acesso múltiplo por divisão de frequência ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access* - OFDMA), e sua variação, o acesso múltiplo por divisão de frequência de portadora única (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access* - SC-FDMA).

O Acesso Múltiplo por Divisão do Espaço (*Space Division Multiple Access* - SDMA) explora a dimensão espacial em antenas através da técnica de múltiplas-entradas-e-múltiplas-saídas (*multiple-input and multiple-output* - MIMO) para aumentar a capacidade da rede. O SDMA utiliza antenas direcionais e técnicas de formação de feixes (beamforming) para criar canais espaciais distintos, concentrando a energia do sinal em uma direção específica. Isso permite que múltiplos usuários compartilhem a mesma frequência simultaneamente, desde que estejam espacialmente separados.

O Acesso Múltiplo Não-Ortogonal (*Non-Orthogonal Multiple Access* - NOMA) é uma

técnica de acesso múltiplo avançada, proposta e estudada principalmente para as redes 5G e com grande potencial para ser implementada no 6G. NOMA permite que múltiplos usuários compartilhem o mesmo recurso de rádio (mesma frequência, mesmo tempo e mesmo código) simultaneamente, podendo aparecer de duas formas: *Power-Domain NOMA* (PD-NOMA) ou *Code-Domain NOMA* (CD-NOMA).

O PD-NOMA [Islam et al. 2017] permite a alocação simultânea de múltiplos dispositivos nos mesmos recursos de tempo e frequência, diferenciando-os pela potência do sinal. Essa abordagem aloca maior potência para dispositivos com canais mais fracos e menor potência para aqueles com canais mais fortes, otimizando a eficiência espectral do sistema. A separação dos sinais no receptor é realizada através do Cancelamento Sucessivo de Interferência (*Successive Interference Cancellation - SIC*), no qual o dispositivo com melhor canal decodifica e subtrai o sinal do outro antes de processar o seu próprio. Essa técnica aumenta a capacidade da rede e reduz a latência, embora introduza maior complexidade no receptor e possa ser afetada por erros na remoção de interferência.

O CD-NOMA [Jehan and Zeeshan 2022] permite a alocação simultânea de múltiplos dispositivos nos mesmos recursos de tempo e frequência, diferenciando-os através de códigos distintos. Métodos como o Acesso Múltiplo de Código Esparsa (*Sparse Code Multiple Access - SCMA*) e o *Multi-User Shared Access* (MUSA) são amplamente utilizados para distribuir os sinais de forma eficiente, minimizando a interferência entre os dispositivos. A decodificação no receptor é realizada por algoritmos que estimam os sinais transmitidos a partir da sobreposição dos códigos. Essa abordagem melhora a eficiência espectral e a conectividade, sendo essencial para redes 5G/6G, especialmente em cenários mMTC. No entanto, a necessidade de algoritmos de detecção mais complexos pode aumentar a latência e o consumo computacional. O CD-NOMA é considerado uma alternativa promissora ao PD-NOMA em cenários onde a alocação de potência não é ideal, tais como o cenário LEO satelital.

O SCMA [Nikopour and Baligh 2013] é uma técnica NOMA que oferece vantagens significativas em termos de capacidade e eficiência espectral em comparação com as técnicas OMAs, como OFDMA. O SCMA utiliza códigos esparsos para mapear os dados dos dispositivos em múltiplas dimensões de recursos, como frequência e tempo, permitindo que vários dispositivos compartilhem os mesmos recursos simultaneamente, sem gerar interferência significativa. Cada dispositivo é atribuído a um código esparsa exclusivo, que define como seus dados serão mapeados nas dimensões de recursos. Técnicas de detecção de múltiplos usuários (*multiple user detection - MUD*) são utilizadas para separar os sinais dos diferentes dispositivos, mesmo quando eles compartilham os mesmos recursos.

O Acesso Múltiplo por Divisão de Taxa (*Rate-splitting Multiple Access - RSMA*) [Mao et al. 2022] se destaca por sua capacidade de gerenciar a interferência de forma mais flexível e eficiente do que as técnicas tradicionais, como SDMA e NOMA convencional. A ideia principal por trás do RSMA é dividir as mensagens dos dispositivos em partes comuns e privadas, na qual a parte comum é transmitida para todos os dispositivos, e as partes privadas são transmitidas individualmente para cada dispositivo. A natureza flexível do RSMA permite que ele tenha um bom desempenho para todos os níveis de interferência [Mao et al. 2018]. O RSMA tem o potencial de mudar o design da camada PHY e da camada MAC dos sistemas 5G/6G, unificando abordagens existentes e contando com uma transmissão sobreposta de mensagens comuns e privadas.

3. Técnicas de Acesso Aleatório

O acesso aleatório é um procedimento fundamental em redes de acesso móveis, que permite que dispositivos móveis estabeleçam uma conexão inicial com a rede e transmitam dados esporadicamente. Ele é utilizado em diversas situações, como ao ligar o dispositivo, ao se conectar a uma nova célula ou quando o dispositivo precisa transmitir dados de forma urgente.

As especificações 3GPP [3GPP 2018, 3GPP 2020] distinguem duas modalidades de acesso aleatório: o baseado em contenção (*Contention-Based Random Access - CBRA*), em que múltiplos dispositivos compartilham os mesmos preâmbulos de forma aleatória, e o livre de contenção (*Contention-Free Random Access - CFRA*), no qual cada dispositivo recebe um preâmbulo dedicado.

No CFRA, que é utilizado principalmente para *handovers*, o procedimento envolve (i) a estação base sinalizar qual preâmbulo o dispositivo deve transmitir, (ii) a transmissão do preâmbulo no canal físico de acesso aleatório (*Physical Random Access Channel - PRACH*) e (iii) a resposta da rede para a finalização do procedimento.

O CBRA consiste em dois procedimentos: o clássico, em quatro etapas, e o otimizado, em duas etapas. A versão clássica envolve (i) a transmissão do preâmbulo no PRACH (*MSG1*), (ii) a resposta para o acesso aleatório (*MSG2*), (iii) a transmissão de uma mensagem RRC (*MSG3*) e (iv) a resolução do RA (*MSG4*). Um mecanismo para transmitir pequenos pacotes de dados durante o procedimento de RA que ficou conhecido como *Early Data Transmission* (EDT) foi introduzido no Release 15 para NR e no Release 14 para LTE-M e NB-IoT. A ideia central do EDT é permitir transmissões de dados de uplink na *MSG3*, onde geralmente só se transmitiam mensagens RRC. Já a versão otimizada em duas etapas envolve (i) a transmissão do preâmbulo no PRACH e dos dados no PUSCH ao mesmo tempo (*MSGA*) e (ii) a resposta do acesso aleatório e resolução de contenção (*MSGB*). Essa nova abordagem reduz o tempo de acesso e a sobrecarga de sinalização, sendo particularmente relevante em cenários com altos RTT, como no caso de enlaces LEO satelitais, e beneficiando especialmente aplicações IoT transmitindo pequenos pacotes.

No procedimento de acesso aleatório tradicional, a transmissão dos preâmbulos acontece em determinados períodos de tempo e é realizada em um canal exclusivo, ortogonal aos demais canais em uplink, utilizando a técnica OMA (particularmente OFDMA ou SC-FDMA) para a transmissão da *MSG3*. No entanto, a utilização dessas técnicas leva a colisões de mensagens *MSG3* quando o mesmo preâmbulo é transmitido por mais de um dispositivo.

Diante da crescente demanda em redes IoT, o acesso aleatório não ortogonal (*Non-Orthogonal Random Access - NORA*) [Liang et al. 2017] surge como uma solução promissora para superar as limitações dos esquemas ortogonais tradicionais, que sofrem com alta latência e baixa eficiência espectral. NORA utiliza a técnica de multiplexação no domínio da potência e o SIC na transmissão e recepção das mensagens *MSG3*. Isto permite explorar as diferentes condições de canal nos dispositivos e possibilita a decodificação das transmissões com base em seus níveis de potência relativos. Ao empregar essas técnicas na *MSG3*, o NORA permite o acesso simultâneo de múltiplos dispositivos ao mesmo recurso, inclusive quando os dispositivos utilizam preâmbulos idênticos. Como resultado, o NORA não apenas expande a capacidade do número de dispositivos suportados, mas também melhora significativamente as taxas de sucesso do acesso aleatório e a eficiência espectral.

O Acesso Aleatório Livre-de-Concessão (*Grant-Free Random Access - GFRA*) [Abbas et al. 2020, Ye et al. 2022] é uma técnica de RA que explora as vantagens do NOMA para otimizar a comunicação em cenários com grande número de dispositivos que transmitem dados de forma esporádica e com baixa taxa, como em aplicações IoT. Diferentemente dos métodos de acesso aleatório tradicionais, que exigem uma solicitação de recursos antes da transmissão, o GFRA permite que os dispositivos transmitam dados diretamente para a estação-base, eliminando as trocas de mensagens presentes no procedimento de acesso aleatório tradicional.

4. Tecnologias Padronizadas para 5G Satelital

A evolução do 5G para NTN visa conectar áreas remotas, com satélites LEO, MEO e GEO. As tecnologias 3GPP para 5G satelital, especialmente em satélites LEO, envolvem ajustes nas camadas PHY e MAC, com foco em preâmbulos, compensação de Doppler, temporizadores, retransmissões e handover. O Technical Report (TR) 38.821 do Release 16 [3GPP 2019] começou um estudo sobre suporte NTN, cujos resultados posteriormente foram incluídos no Release 17 [3GPP 2022a] [3GPP 2022b], com algumas melhorias na integração de satélites LEO, assim como aprimorando soluções para mobilidade, latência e cobertura ampla. As especificações do Release 17 fornecem a base arquitetural e de sinalização para a adaptação ao ambiente satelital.

O Release 17 [3GPP 2022a], além de definir os recursos apresentados em [3GPP 2019], apresenta algumas melhorias e novas definições para o melhor entendimento desse novo paradigma de NTN em redes móveis, como uma nova descrição da utilização de NTN usando plataformas de alta altitude (HAPS) para fornecer acesso via rádio a dispositivos; a introdução do conceito de Satélite de Órbita Não-Geoestacionária (*non-geostationary satellite orbit - NGSO*) para incluir órbitas de baixa (LEO) e média altitude (MEO), com satélites localizados entre 300 km e 25.000 Km acima da superfície terrestre, podendo ser ajustada de acordo com a movimentação das células ou com feixes direcionáveis; e, por fim, uma descrição de tipos de enlaces de serviços sendo: Earth-fixed para feixes que cobrem continuamente a mesma área geográfica, Quasi-Earth-fixed para feixes que cobrem uma área geográfica por um período limitado, com possibilidade de mudança, e Earth-moving para feixes que se movem sobre a superfície da Terra, cobrindo áreas variáveis.

Na camada PHY, características intrínsecas dos enlaces satelitais LEO, tais como o efeito Doppler, altos valores de retardos e de sua variância, demandam ajustes nos preâmbulos e técnicas

de compensação de tempo e frequência. O TR 38.821 [3GPP 2019] sugere uma pré-compensação para corrigir desvios de frequência e atraso de propagação, além de investigações sobre NOMA que visam aumentar a eficiência espectral, embora o OFDMA e o SC-FDMA sejam os métodos principais atualmente.

O protocolo MAC, como detalhado no TR 38.821 [3GPP 2019], deve ser ajustado para lidar com maiores atrasos e mobilidade encontrados nos satélites LEO. Os principais pontos incluem: ajustes nos parâmetros de temporização (como T300, T301) para compensar os altos RTTs, posteriormente expandido com o conceito de Common Timing Advance (TA) introduzido no Release 17 [3GPP 2022a] que ajuda a sincronizar os sistemas e melhorar a eficiência da comunicação; maior janela de tempo para retransmissões (*Hybrid Automatic Repeat Request - HARQ*), ou mesmo desabilitação em cenários GEO, evitando sobrecarga do sistema; otimização dos *handovers*, como Conditional Handover, devido à movimentação dos satélites, além do uso de efemérides para antecipação de variações de cobertura.

No RA, o TR 38.821 descreve as abordagens com quatro e com dois passos. Fora isso, a rápida variação de distância em satélites LEO aumenta o risco de colisões e, assim, soluções como o aumento de oportunidades de acesso aleatório (random access opportunities - RAO) e pré-compensação Doppler são propostas para melhorar a confiabilidade [3GPP 2019]. Além disso, os ajustes no protocolo de Controle de Recurso Rádio (*Radio Resource Control - RRC*) (confirmação de que os recursos estão alocados), conforme Release 17 [3GPP 2022b], são discutidos com ênfase na camada MAC.

5. Desafios para o Suporte de 5G/6G Integrado com Satélites LEO

Apesar dos avanços significativos padronizados pelo 3GPP para a integração de NTN no ecossistema do 5G, diversos desafios ainda persistem, especialmente quando se consideram os cenários com satélites LEO. Esses desafios tornam-se ainda mais relevantes à medida que se avança para o desenvolvimento do 6G, onde espera-se que a conectividade via satélite não seja apenas complementar, mas integrada de forma nativa à infraestrutura da rede. A literatura e os documentos técnicos do 3GPP evidenciam lacunas que ainda precisam ser abordadas em nível de desempenho, energético e operacional.

Um dos problemas técnicos enfrentados em constelações LEO está relacionado ao procedimento de *handover*. Devido à movimentação constante em alta velocidade dos satélites LEO, os terminais terrestres são atendidos por diferentes feixes de satélites em intervalos curtos de tempo. Esse comportamento implica em uma frequência de *handovers* muito maior do que a observada em redes móveis terrestres tradicionais. Mesmo com a introdução de *Conditional Handovers* e o uso de efemérides para antecipação de eventos de troca de célula, como proposto no 3GPP [3GPP 2019], a rede precisa processar e executar um grande número de transições, o que sobrecarrega os elementos de controle e o procedimento de acesso aleatório, impactando diretamente a qualidade de serviço (*Quality of Service - QoS*). Além disso, há limitações em termos de latência de sinalização, o que dificulta a realização de *soft handovers*, especialmente para aplicações onde o tempo é um fator crítico.

Outros pontos críticos são o consumo energético associado ao RA e a alocação de recursos. Em ambientes com ampla cobertura, como LEO, há uma necessidade de utilizar potências de transmissão maiores e uma maior probabilidade de colisões de preâmbulos, exigindo múltiplas tentativas de acesso por parte do dispositivo, resultando em um maior uso do transmissor e, portanto, maior consumo energético. O TR 38.821 [3GPP 2019] reconhece a necessidade de aumentar o número de RAOs para reduzir colisões e a utilização de preâmbulos robustos para lidar com altos atrasos. No entanto, tais soluções elevam a complexidade e a densidade de sinalização, afetando negativamente dispositivos que possuem restrições severas de energia, como dispositivos IoT. Para esses dispositivos, cada tentativa extra de acesso pode representar uma perda considerável de tempo de vida útil da bateria, o que compromete aplicações em áreas remotas ou com manutenção limitada.

Também existem desafios relacionados à alocação eficiente de recursos no uplink em ambientes com grande RTT. As decisões de escalonamento precisam ser feitas com base em informações desatualizadas, o que pode levar a ineficiências no uso espectral e aumento de latência. Dessa forma, o HARQ precisa ser adaptado ou desabilitado, como já considerado em [3GPP 2019], a fim de evitar penalizações de desempenho decorrentes do atraso, impactando diretamente a confiabilidade das transmissões e exigindo abordagens alternativas para garantir a entrega confiável de dados.

Por fim, destaca-se que grande parte das soluções atualmente padronizadas é adaptada a partir de configurações pensadas para redes terrestres; portanto, ainda existe uma carência de soluções nativamente otimizadas para o ambiente LEO, que considerem suas peculiaridades orbitais, de cobertura e de propagação. Isso representa uma lacuna na literatura e na padronização, especialmente quando se pensa em arquiteturas integradas e nativas para o 6G.

6. Tendências de 5G/6G Integrado com Satélites LEO

Nos últimos anos, tem crescido o número de pesquisas voltadas à integração de constelações de satélites LEO nas futuras gerações de redes móveis (5G Advanced e 6G). A principal motivação consiste em estender a cobertura, capacidade e robustez dos sistemas terrestres, levando conectividade a áreas remotas ou de difícil acesso, bem como suportando serviços sensíveis à latência e a requisitos de grande largura de banda. Diante disso, surgiram propostas específicas voltadas a solucionar problemas no RA, na alocação de recursos, em mobilidade, eficiência energética e *handover* em ambientes não terrestres. Os trabalhos recentes disponibilizados contemplam diferentes enfoques, porém convergem na busca de soluções capazes de lidar com a alta dinâmica, grande atraso e, por vezes, limitada capacidade de processamento/energia característicos de satélites LEO.

A seguir, destacamos algumas das tendências presentes nesses trabalhos, associadas à consolidação do 5G e ao desenvolvimento do 6G para LEO. Primeiramente, observa-se o uso intensivo de técnicas de aprendizado de máquina e algoritmos de otimização avançados, a exemplo dos artigos que empregam Deep Reinforcement Learning (DRL) tanto para alocação de potência em esquemas NOMA [Lee et al. 2024] quanto para RA, gerenciamento de mobilidade e redução de colisões em *handover* [Lee et al. 2023, Lee et al. 2022]. Em paralelo, surgem abordagens específicas de alocação de recursos e *beamforming* visando maximizar a taxa agregada ou minimizar o consumo energético, o que se evidencia em soluções para sistemas multi-satélite [Shaat and Caus 2024] e no estudo de RA eficiente para IoT [Zhen et al. 2020, Wang et al. 2024]. Além disso, o tema do handover, frequente em ambientes LEO, vem sendo explorado por protocolos que antecipam a mobilidade por meio de coordenação inteligente ou aprendizagem de padrões orbitais [Lee et al. 2023, Huang and Chen 2024], reduzindo atrasos de acesso e a probabilidade de colisão. Por fim, métodos de multi-conectividade que conciliam enlaces terrestres e satelitais vêm sendo propostos para melhorar a vazão ou robustez em cenários Beyond 5G [Majamaa et al. 2023].

Desse modo, para conseguir o avanço das redes celulares para o 5G Advanced e o 6G, mostra-se fortemente necessário atrelar à adoção de constelações LEO como parte essencial das infraestruturas de conectividade global. Os métodos avançados de RA, a alocação dinâmica de recursos e o cuidado especial com a eficiência energética traçam tendências-chave para garantir confiabilidade, robustez e escalabilidade, bem como grandes áreas de cobertura. Nesse sentido, espera-se que a consolidação de técnicas de aprendizado de máquina e soluções voltadas à otimização seja o objetivo quanto à integração de redes satelitais e terrestres, garantindo um bom funcionamento da conectividade para a próxima geração.

7. Considerações Finais

A integração de satélites LEO é chave para a conectividade global em redes 5G/6G. Este trabalho revisou o acesso aleatório (RA) neste cenário, identificando desafios críticos como alta mobilidade, tempos de ida e volta elevados e o efeito Doppler. Esses fatores particulares do cenário satelital LEO limitam a eficiência do RA tradicional, aumentando colisões, latência e consumo energético, que são fatores que impactam especialmente dispositivos IoT. Embora o 3GPP tenha introduzido adaptações para redes não terrestres (NTN) na padronização das redes 5G (Rel. 17/18), persistem lacunas, sendo necessárias soluções otimizadas nativamente para o ambiente LEO. Tendências futuras apontam para o uso intensivo de IA/ML na otimização do RA, alocação de recursos, gestão de mobilidade e eficiência energética. Superar os desafios do RA com abordagens inovadoras e específicas para LEO é, portanto, vital para a efetiva integração satélite-terrestre nas futuras redes 6G.

8. Agradecimentos

Pesquisa parcialmente financiada pelo CNPq (proc. 405940/2022-0 e 403979/2023-4), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 88887.954253/2024-00e o Programa de Incentivo a Novos Docentes (PIND) da UNICAMP proc. 3406/23.

Referências

- 3GPP (2018). NR; Overall description; Stage-2. Technical Specification (TS) 38.300, 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Version 15.0.0.
- 3GPP (2019). Solutions for nr to support non-terrestrial networks (ntn). Technical Report ATIS.3GPP.38.821.V1600, ATIS. 3GPP TR 38.821 V16.0.0 (Release 16).
- 3GPP (2020). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2. Technical specification (TS) 38.300, 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Version 16.0.0.
- 3GPP (2022a). 5g; nr; nr and ng-ran overall description; stage-2 (3gpp ts 38.300 version 17.1.0 release 17). Technical Report ETSI TS 138 300 V17.1.0, ETSI. Release 17.
- 3GPP (2022b). 5g; nr; radio resource control (rrc); protocol specification (3gpp ts 38.331 version 17.1.0 release 17). Technical Report ETSI TS 138 331 V17.1.0, ETSI. Release 17.
- Abbas, R., Huang, T., Shahab, B., Shirvanimoghaddam, M., Li, Y., and Vucetic, B. (2020). Grant-free non-orthogonal multiple access: A key enabler for 6g-iot. *CoRR*, abs/2003.10257.
- Cui, H., Zhang, J., Geng, Y., Xiao, Z., Sun, T., Zhang, N., Liu, J., Wu, Q., and Cao, X. (2022). Space-air-ground integrated network (sagin) for 6g: Requirements, architecture and challenges. *China Communications*, 19(2):90–108.
- Huang, X. and Chen, P. (2024). Mobility management scheme in integrated satellite-terrestrial communication system. In *2024 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, pages 1–6. IEEE.
- Islam, S. M. R., Avazov, N., Dobre, O. A., and Kwak, K.-s. (2017). Power-domain non-orthogonal multiple access (noma) in 5g systems: Potentials and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(2):721–742.
- Jehan, A. and Zeeshan, M. (2022). Comparative performance analysis of code-domain noma and power-domain noma. In *2022 16th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, pages 1–6.
- Kodheli, O., Lagunas, E., Maturo, N., Sharma, S. K., Shankar, B., Montoya, J. F. M., Duncan, J. C. M., Spano, D., Chatzinotas, S., Kisseleff, S., Querol, J., Lei, L., Vu, T. X., and Goussetis, G. (2021). Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 23(1):70–109.
- Lee, J.-H., Park, C., Park, S., and Molisch, A. F. (2023). Handover protocol learning for leo satellite networks: Access delay and collision minimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 23(7):7624–7637.
- Lee, J.-H., Seo, H., Park, J., Bennis, M., and Ko, Y.-C. (2022). Learning emergent random access protocol for leo satellite networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 22(1):257–269.
- Lee, J.-I., Hsu, Y.-H., and Sun, S.-S. (2024). A drl-based noma power allocation scheme for leo satellite networks. In *2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall)*, pages 1–5. IEEE.
- Liang, Y., Li, X., Zhang, J., and Ding, Z. (2017). Non-orthogonal random access for 5g networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(7):4817–4831.
- Lin, X. and Lee, N. (2021). *5G and Beyond: Fundamentals and Standards*. Springer Cham, 1 edition.
- Majamaa, M., Martikainen, H., Puttonen, J., and Hämäläinen, T. (2023). Satellite-assisted multi-connectivity in beyond 5g. In *2023 IEEE 24th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, pages 413–418. IEEE.
- Mao, Y., Clerckx, B., and Li, V. O. (2018). Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: bridging, generalizing, and outperforming sdma and noma. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, (133).
- Mao, Y., Dizdar, O., Clerckx, B., Schober, R., Popovski, P., and Poor, H. V. (2022). Rate-splitting multiple access: Fundamentals, survey, and future research trends. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 24(4):2073–2126.

- Nikopour, H. and Baligh, H. (2013). Sparse code multiple access. In *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 332–336.
- Saarnisaari, H., Laiyemo, A. O., and de Lima, C. H. M. (2019). Random access process analysis of 5g new radio based satellite links. In *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, pages 654–658.
- Shaat, M. and Caus, M. (2024). Efficient radio resource management for rate maximization in leo multi-satellite systems. In *2024 3rd International Conference on 6G Networking (6GNet)*, pages 102–106. IEEE.
- Wang, Q., Chen, S., Yang, C., Qi, W., Zong, J., Xia, X., and Wang, D. (2024). Energy-efficient task split and resource allocation in leo satellites assisted iot network. *IEEE Internet of Things Journal*.
- Ye, N., Yu, J., Wang, A., and Zhang, R. (2022). Help from space: grant-free massive access for satellite-based iot in the 6g era. *Digital Communications and Networks*, 8(2):215–224.
- Zhen, L., Bashir, A. K., Yu, K., Al-Otaibi, Y. D., Foh, C. H., and Xiao, P. (2020). Energy-efficient random access for leo satellite-assisted 6g internet of remote things. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(7):5114–5128.