

Estudo sobre Aplicação de Rádio Definido por Software em Comunicações via Satélite

Hallan L. Fonseca, Arielli A. Conceição, Daniely G. Silva, Evandro C. Vilas Boas

Abstract - Satellite communication represents an essential means of communication for the development of various sectors of society. The reduction of hardware costs in the manufacture of new satellites and the launch process boosted the development of this sector. Moreover, satellites enable global coverage compared to terrestrial communication networks and systems. On the other hand, the large number of satellites in orbit introduces the scarcity of spectrum within the dedicated frequency bands, fostering the need to develop a solution that allows the efficient use of bandwidth to support the reception of multiple simultaneous signals and increase the throughput. A possible solution to these problems is introducing the software-defined radio concept to provide flexibility, reconfigurability, and efficiency in satellite communication systems through the dynamic control of resources such as frequency, transmission rate, and bandwidth. In this context, this work presents a literature review on software-defined radio applied to satellite communications solutions. Research and developed applications are reviewed, highlighting the leading technologies and approaches. Likewise, research opportunities are identified to develop future work in the area.

Keywords—satellite communication, software-defined radio, satellite.

Resumo - A comunicação via satélite representa um importante meio de comunicação para o desenvolvimento de diversos setores da sociedade. A redução de custos de *hardware* na confecção de novos satélites e no processo de lançamento impulsionou o desenvolvimento desse setor. Comparada às redes e sistemas de comunicação terrestre, os satélites viabilizam uma cobertura em âmbito global. Por outro lado, o maior número de satélites em órbita introduz a escassez de espectro dentro das faixas de frequências dedicadas, fomentando a necessidade de desenvolver uma solução que permita o uso eficiente da largura de banda para suporte à recepção de múltiplos sinais simultâneos e aumento das taxas de transmissão. Uma possível solução para tais problemas é a introdução do conceito de rádio definido por *software* para prover flexibilidade, reconfigurabilidade e eficiência nos sistemas de comunicação por satélite através do controle dinâmico de recursos como frequência, taxa de transmissão e largura de banda. Nesse contexto, esse trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre aplicação de rádio definido por *software* em comunicações por satélite. Revisam-se pesquisas e aplicações desenvolvidas e destacam-se as tecnologias e abordagens principais. Assim como, identificam-se oportunidades de pesquisa para o desenvolvimento de trabalhos futuro na área.

Palavra Chave—comunicação por satélite, rádio definido por *software*, satélite.

I. INTRODUÇÃO

A comunicação via satélite representa um importante meio de comunicação para o desenvolvimento de diversos setores da sociedade. Os avanços recentes em relação a redução de custos de *hardware* na confecção de novos satélites quanto

no lançamento impulsionou o desenvolvimento desse setor. Comparada às redes e sistemas de comunicação terrestre, os satélites viabilizam uma cobertura em âmbito global, atingindo regiões remotas ou de baixa densidade demográfica.

Segundo dados de pesquisa divulgados pelo Centro Regional para o Desenvolvimento da Informação (Cetic.br), 26% da população brasileira ainda não tem acesso a Internet, sendo o principal motivo a inviabilidade econômica em regiões remotas [1]. Com o desenvolvimento do mercado de satélites essa lacuna social e outras vertentes do mercado poderão ser atendidas de forma eficiente e competitiva pelas comunicações via satélite em relação às redes terrestres. Por exemplo, o satélite Viasat-2 (2017) é capaz de prover até 100 Mbps em algumas regiões remotas nos Estados Unidos [2]. No Brasil, o mercado de satélites alcançou a cifra de US\$450 milhões em 2020 e estima-se que esse número chegará a US\$ 1 trilhão em 2040.

Nesse cenário, os pequenos satélites se destacam devido à redução do tempo e custo de produção, maior facilidade de lançamento, entre outras soluções que os tornam candidatos ideais para constelações de baixa órbita terrestre (LEO, *Low Earth Orbit*) [3], [4]. Recentes lançamentos consideram suas aplicações para missões práticas/comerciais como, por exemplo, o monitoramento de desastres, serviços de navegação e observação da Terra. Além disso, os satélites de órbita baixa atraem universidades e pequenas indústrias, que investem no desenvolvimento de pequenos satélites com base no uso de tecnologia de comunicação amadora e alocações de frequência [5]–[7]. Por outro lado, o maior número de satélites em órbita introduz a escassez de espectro dentro das faixas de frequências dedicadas, fomentando a necessidade de desenvolver uma solução que permita o uso eficiente da largura de banda para suporte à recepção de múltiplos sinais simultâneos e aumento das taxas de transmissão. Os sistemas de comunicação existentes para os pequenos satélites não são capazes de solucionar esses problemas, devido à construção simples, processadores de sinais limitados e *hardware* simplificado para obter a miniaturização. Além disso, gerenciá-los implica em altos custos dos equipamentos e instalações dos sistemas de comunicação [8], [9].

Rádio definido por *software* (SDR, *software defined radio*) é uma tecnologia que permite a implementação de soluções e sistemas de *hardware* por meio de programação [10]. Dessa forma, possibilita-se a adição de novos recursos e capacidades sem fio aos sistemas de rádio existentes sem a necessidade de substituição do *hardware*. Além disso, essa plataforma é adaptável e fornece a recepção de múltiplos sinais simultâneos

e o controle dinâmico de recursos de frequência, taxa de transmissão, largura de banda, entre outros [6]. Dessa forma, introduz-se flexibilidade, reconfigurabilidade e eficiência nos sistemas de comunicação baseados em SDR, viabilizando a implementação de soluções complexas [9], [11]. Estima-se que o mercado de SDR atingirá US\$ 24,9 bilhões em 2027, crescendo US\$ 6,4 bilhões a mais que o estimado para o ano de 2020 [12].

No âmbito das comunicações via satélite, existem avanços significativos em termos de pesquisa e implementação em sistemas espaciais. Por exemplo, cita-se o *Satellite Adaptive Communication Channel* (SACC), financiado pela Agência Espacial Europeia (ESA), que visa aumentar a quantidade de dados enviados para os satélites. Há também um projeto da Universidade de L'Aquila, na Itália, que demonstrou o impacto do SDR em aplicações complexas, como na realização de medidas de alcance de um satélite geoestacionário. Soluções como essas são de suma importância, pois permitem que os transceptores de comunicação por satélite sejam atualizados por *software* de acordo com os avanços tecnológicos dos padrões de comunicação. Entretanto, esses estudos são escassos ou estão em fase inicial de desenvolvimento [8], [9]. Portanto, este trabalho visa realizar um estudo e levantamento dos recentes avanços na aplicação de SDR em comunicações via satélite, abordando as principais tecnologias, os desafios e possíveis soluções para a área.

Estruturou-se o trabalho em cinco seções. Na Seção II, comenta-se sobre trabalhos relacionados ao estudo e revisão do uso de SDR em sistemas espaciais ou semelhantes. Discute-se sobre a aplicação dessa tecnologia em comunicações via satélite na Seção III. Na Seção IV, apresenta-se uma análise de comparação entre vários trabalhos e estudos da área, abordando pontos como tecnologias utilizadas, suas características e possíveis deficiências a serem exploradas. Apresenta-se os principais comentários e conclusões na Seção V.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

A tecnologia SDR tem sido o foco de diversos trabalhos [13]–[18]. Em [13], detalham-se a arquitetura SDR e tipos de plataformas, comparando-as em relação às suas principais características e funcionalidades em termos de eficiência energética, área e poder computacional. Destacam-se áreas de pesquisa parcialmente investigadas como atualizações remotas dos sistemas, virtualização de funções de rede utilizando o SDR, atraso de comunicação entre o controlador e as plataformas SDR pelo uso do controle de rede centralizado, eficiência energética e aspectos de segurança. Haque e Abu-Ghazaleh [14] analisaram o uso de redes definidas por *software* em configurações de rede sem fio, classificando os desafios e possíveis soluções para cada tipo de rede (redes celulares, redes de sensores, redes *mesh* e redes domésticas). Ressaltou-se o uso do SDR em uma arquitetura de rede virtualizada, falhas de segurança (ex.: confiabilidade e escalabilidade) e a aplicação de SDR em outros campos como oportunidades de pesquisa em aberto.

Em [15], aborda-se a aplicação conjunta de tecnologias SDR, MEC (*Multi-Access Edge Computing*) e NFV (*Network*

Functions Virtualization) para prover o fatiamento de recursos em redes móveis de quinta geração (5G). Propõem-se diversas áreas de pesquisas e elecam-se desafios no uso de SDR em redes 5G, como a adaptabilidade do núcleo 5G nativo da nuvem, hibridização de máquinas virtuais e *containers* para promover uma total virtualização da função de rede, dinamismo e modularidade na arquitetura de *software* 5G, gerenciamento da confiança de uma rede fatiada entre diferentes administradores, entre outras.

Abordam-se aspectos de segurança em SDR e rádio cognitivo em [16], listando os requisitos de implementação, as principais ameaças e desafios de segurança e as técnicas de proteção, detalhando sobre o uso de certificados de segurança. Em [17], discute-se a proposta de convergência das tecnologias de SDR, rede definida por *software* e virtualização para expansão do suporte e programação de diferentes aplicações. Analisam-se pesquisas recentes em redes programáveis, classificando-as e detalhando-as. Os autores em [18] abordaram os conceitos e a importância das redes móveis definidas por software (SDMNs, *software defined mobile networks*), elencando os principais desafios e oportunidades de pesquisas em aberto.

No âmbito das comunicações por satélite, aborda-se SDR para prover o processamento de multi-sinais simultâneos por multi-satélites [6]. Em [19], propôs-se uma solução SDR baseado no sinal B2b para decodificação de informações de serviços PPP (*precise point positioning*). Por meio dos dados, avaliaram-se a integridade e estabilidade do serviço e realizou-se correções. Em [8], os autores apresentaram uma análise de um sistema de banda base utilizando SDR e como referência o diagrama de bloco de fluxo funcional (FFBD, *functional flow block diagram*). Abordaram-se aspectos de gerenciamento e funcionamento de padrões de telemetria e telecomando, assim como implementações de *hardware* que podem ser substituídos ou melhorados por um sistema baseado em SDR. Em [11], propõe-se o SDR como solução para a correção de falha de recepção simultânea de sinais de vários satélites. Detalhou-se e analisou-se essa tecnologia, segmentando possíveis plataformas, soluções e aplicativos para uso de uma arquitetura SDR no processamento de sinais simultâneos.

Em [20], apresenta-se o SDR como uma tecnologia para evolução dos sistema global de navegação por satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite System*). Detalha-se a arquitetura e projeta-se um receptor GNSS SDR com alto desempenho, baixo custo, e suas diversas aplicações relacionadas à segurança humana ou à navegação de aeronaves. Em [23] contextualizam-se e listam-se os principais trabalhos relacionados à aplicação de SDR em comunicação por satélite com foco em custo, consumo energético, potência e adaptabilidade. Apresentam-se soluções inovadoras em SDR, descrevendo o SDR como solução de aproveitamento de outros dispositivos já existentes. Em [21], desenvolveu-se um sistema espacial distribuído de acesso múltiplo por divisão de código (CDMA, *Code-division multiple access*) para otimização de um enlace inter-satélite para pequenos satélites, através de SDR. Experimentou-se e simulou-se vários aspectos para comprovação do funcionamento e eficácia do modelo proposto. Além disso, inclui-se análises de segurança e ampliação

Tabela I: Trabalhos relacionados ao estudo de aplicação de tecnologia SDR em comunicações por satélite.

Referência	Abordagem
[6]	Especifica-se os componentes de <i>hardware</i> relacionados ao processamento de sinal da tecnologia SDR e detalha os CoTS, abordando algumas plataformas SDR utilizadas para desenvolver uma estação terrestre de satélite.
[8]	A pesquisa segmenta aplicações de SDR em sistemas de banda base, nas áreas de telemetria, telecomando, alcance e medições Doppler, através da análise funcional do FFBD.
[11]	Discute-se sobre componentes de <i>hardware</i> SDR com ênfase em dispositivos de processamento de sinal em comunicações espaciais. Apresentam-se e comparam-se diversos tipos de soluções práticas, aplicativos e plataformas de desenvolvimento, entre outros pontos da arquitetura SDR.
[13]	Apresenta-se uma visão geral da arquitetura SDR em comunicações sem fio, discutem-se as principais plataformas e arquiteturas básicas e revisa-se trabalhos de pesquisa na área.
[14]	Enfocam-se quatro classes de rede sem fio (celulares, sensores, <i>mesh</i> e redes domésticas) e elencam os principais desafios e soluções potenciais com o uso de SDR.
[15]	Apresentam-se os avanços recentes e questões abertas na divisão de rede com foco na adaptação do núcleo 5G nativo da nuvem, MEC e SDR para atender à requisitos e aplicações 5G.
[16]	Abordam-se aspectos de segurança das tecnologias SDR/CR, especificando os principais tipos de ameaça, técnicas de proteção, requisitos e contramedidas.
[17]	Propõe-se a convergência das tecnologias SDN, SDR e virtualização em aplicações e serviços de rede.
[18]	Apresenta-se uma visão geral sobre o que são as redes móveis definidas por software (SDMN), tecnologias, pesquisas e desafios.
[19]	Realizam-se estudos sobre a aplicação de SDR em satélite e na aquisição de informações de serviços PPP pelo sinal PPP-B2B.
[20]	Discutem-se aspectos da arquitetura de um receptor de software GNSS e propõe-se seu aprimoramento por meio da tecnologia SDR.
[21]	Apresenta-se uma rede de comunicação inter-satélites usando SDR que permite múltiplos acessos ao canal de comunicação.
[22]	Introduz-se o uso da tecnologia em aplicações para redução e liberação do espectro de frequência atual e seu uso eficiente.

de números de usuários como trabalhos futuros para aprimorar o modelo. Por fim, os autores em [22] avaliam o uso da tecnologia SDR para alocação dinâmica do espectro de frequência. Discute-se as principais limitações e recomendações sobre essa aplicação e pontos para aumento de sua eficiência. Na Tabela I, sintetiza-se os trabalhos relacionados ao estudo de aplicação de tecnologia SDR em comunicação por satélite quanto a sua abordagem principal.

III. RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE EM COMUNICAÇÕES VIA SATÉLITE

Nos últimos anos, diferentes artigos mostrando o uso da tecnologia de SDR, em comunicações sem fio, e suas respectivas vantagens foram publicados [24]–[27]. Alguns autores abordaram essa tecnologia juntamente com a NFV em cenários de acesso à banda larga para identificar aplicações relacionadas a esses paradigmas [24]. Para provar as limitações causadas pelo alcance do pseudoruído (PN, *pseudonoise*) não-regenerativo, o alcance do PN regenerativo em um transpônder JPL implementado com SDR, denominado Íris, para pequenos satélites foi apresentado [25]. Foi comprovado que a variação regenerativa PN é muito mais vantajosa por ser simples, ter um maior alcance e uma aquisição mais rápida de sinais [25]. Em [26], o SDR também é apresentado como solução para garantir a proteção das formações de feixe digital (DBFs, *digital beamforming*) em uma FPGA (*field-programmable gate array*) por meio de codificação. O projeto foi analisado em diferentes tipos de decomposição, vertical e horizontal, das formações de feixe digital em grande escala (LS-DBF, *Large scale digital beamforming*) e concluiu-se que em ambos os esquemas, a proteção tem uma melhora de confiabilidade extremamente significativa de 96% e 85%, respectivamente [26]. Outros autores apresentam o projeto do receptor SDR que utiliza filtros casados para a demodulação e executa uma pesquisa *Doppler* completa e compensação em tempo real, armazenando e processando dados em blocos. O funcionamento do projeto foi comprovado por meio de estudos, simulações e operações com satélites em órbita, mostrando

a sua superioridade em relação à abordagem tradicional de técnicas de processamento de sinal causal [27].

Devido à escassez do espectro de frequência pelo aumento do número de satélites, vários autores dedicaram seus trabalhos ao desenvolvimento de aplicações espaciais com o uso do SDR para oferecer o compartilhamento de frequências por múltiplos usuários e/ou inter-satélites [9], [21], [28], [29]. Alguns autores experimentaram esse compartilhamento de acesso entre os satélites através de uma rede de comunicação em modulações BPSK e QPSK utilizando o SDR com o acesso múltiplo por divisão de código (CDMA, *code division multiple access*) [21]. O trabalho apresentado em [28] explora o uso de uma arquitetura de sistema embarcada que suporta vários sinais simultâneos de satélite. Uma nova arquitetura SDR que combina FPGA, COTS (*Commercial Off-The-Shelf*) e um transceptor de rádio de frequência programável é proposta, com foco em missões de pequenos satélites, para permitir a recepção de diferentes sinais em um único equipamento. Para uso eficiente da largura de banda limitada, alguns autores implementaram uma arquitetura paralela que combina *hardware* SDR de baixo custo e ferramenta de *software* de código aberto, permitindo a recepção multi-satélite [29].

Em decorrência dos problemas e limitações dos modelos de estruturação das comunicações inter-satélites atuais, alguns autores apresentaram a virtualização de grande parte da rede por meio de plataformas de SDR como solução [30]–[35]. Para solucionar esse problema de estruturação das redes, foi proposta a formação de redes definidas por *software* com a utilização de SFC. Após testes de comparação de sua implementação nos padrões multi-domínio e de formação de satélite, foi verificado que ambos os métodos apresentam vantagens e desvantagens dependendo das condições em que são submetidos [30]. Um modelo de otimização do transmissor e receptor SDR baseado em FPGA também foi proposto, o qual foi capaz de reduzir em até dois terços o *hardware* utilizado [31]. A eficiência do SDR em um projeto de transferência contínua também foi testada, demonstrando a melhoria desse sistema em comparação aos tradicionais, superando-os em ter-

mos de latência, taxa de transferência e QoE do usuário [32]. Em [33] também apresenta uma rede integrada de satélite-terrestre 5G baseada em SDR que foi capaz de reduzir o tempo de entrega dos dados e obter maior desempenho, em comparação com arquiteturas anteriores. Visando a utilização eficiente dos recursos de energia e frequências, foi desenvolvido um projeto de AFCS para canais de comunicação entre CubeSats e sistemas terrestres, por meio de sistemas de SDR, o qual foi capaz de melhorar suficientemente a qualidade e a eficiência energética espectral da transmissão [34]. Um grupo de autores propôs duas abordagens de integração de CubeSats com plataformas de SDR e um rádio equipado com um SoC FPGA com alta taxa de dados. Estimou-se que o projeto pode atingir uma alta taxa de dados, com baixo consumo de energia, além de ser reconfigurável em voo [35].

O uso da comunicação e do controle adaptativos oferecidos pela substituição de muitos dispositivos de *hardware* por dispositivos de *software* também foram explorados em diversos trabalhos, visando obter flexibilidade, controle e maximizar os dados recebidos por estações terrestres [27], [36]–[43]. Um receptor com o sistema SACC desenvolvido por *software* em linguagem C++ foi capaz de aumentar a velocidade do processamento do sinal, com apenas algumas perdas de informação no processo [36]. Esse tipo de comunicação foi validada através do lançamento de um satélite LEO, no qual empregaram-se vários módulos SDR e PCs, com a programação do transmissor e do receptor da estação terrestre em linguagem C/C++ [37]. Outros autores apresentaram o uso do recurso de adaptatividade em medições meteorológicas através de um sistema *open-source* SDR para recepção e decodificação de imagens dos satélites NOAA [38]. Também relacionado a recepção de imagens, apresentou-se um sistema de recepção de imagens genéricas, desenvolvido através do simulink [39]. Utilizando as vantagens geradas pelo *hardware* programável e adaptável, alguns autores desenvolveram um sistema de medição de alcance geostacionário de satélites por meio de técnicas de PN e SDR [40]. Desenvolveu-se um projeto de SDR baseado em FPGA para implementar as vantagens de reconfigurabilidade oferecidas pela tecnologia em um nanosatélite [41].

Em [42], verifica-se a introdução de uma arquitetura definida por *software* que provê alta eficiência e flexibilidade, permitindo o controle de topologia, escalabilidade de roteamento, gerenciamento de mobilidade e entrega de conteúdo por meio de um controlador que monitora e coleta informações vindas dos satélites. Um sistema de controle adaptativo da potência transmitida através da estimativa da SNR do canal fornecida pelo algoritmo M2M4, implementado em uma plataforma SDR, é apresentado em [43]. Considerando que a maioria dos sistemas de comunicação são projetados para os piores cenários atmosféricos e ionosféricos, simulou-se um sistema de comunicação adaptável às características variáveis por SDR entre estações terrestres e CubeSats [44]. Esse sistema emprega os protocolos SSP para conexões físicas e AX.25 para transmissão de rádio. Também foi utilizada a técnica CRC para análise de erro dos dados e implementação no LabVIEW com diferentes técnicas de modulação [44].

IV. OPORTUNIDADES DE PESQUISA EM SDR APLICADO AOS SATÉLITES

Pesquisas relacionadas à substituição de métodos antigos em novos, utilizando SDR são uma tendência nas academias. O motivo disso são as vantagens do SDR que envolvem adaptabilidade e reconfigurabilidade. Entretanto, muitos sistemas utilizando SDR estão longe de ser o ideal. Com isso, oportunidades são geradas para pesquisas futuras. No trabalho [45] é construída uma estrutura integrada de rede de comunicação espacial terrestre por satélite. O artigo apresenta uma engenharia de tráfego flexível e ágil, porém com a estrutura de controle centralizada identifica-se problemas com segurança. Além disso, o projeto tem problemas com escalabilidade e exige estratégias de simplificação de agregação de tarefas de fluxo. Por fim, o autor sugere estudar o equilíbrio entre o período de atualização e a sobrecarga de gerenciamento e propor cenários mais adequados para o sistema.

Em [37], observa-se o desempenho dos sistemas adaptativos. O trabalho mostra as vantagens dos sistemas adaptativos, porém a rápida mudança do deslocamento *Doppler* foi considerado um problema sério que deve ser levado em consideração. Em [46], apresenta-se um sistema SDR baseado em FPGA que tem como característica a redução do *hardware* em dois terços. Esse sistema apresenta uma pequena degradação de desempenho, mostrando margens para pesquisa mais aprofundada e melhoria do modelo. O artigo [47] revisa uma nova arquitetura paralela para suportar recepção de multi-satélites. Esse sistema apresenta uma evolução dos sistemas modernos e abre margem para pesquisas futuras relacionadas a taxas de dados e otimização de consumo de energia. Os autores em [48] tratam a questão de eficiência energética em transmissores adaptativos. O projeto visa melhorar a eficiência espectral de uma transmissão. O protótipo demonstra ser um sucesso mas longe do ideal, sendo assim abre espaço para pesquisas futuras.

Os autores em [40] demonstraram medições de alcance em um satélite geoestacionário. Para isso é proposto um sistema de baixo custo com um *hardware* programável utilizando SDR. Os resultados foram promissores, obtendo erros rms em torno de 25 cm em 1 segundo. Nesse projeto existe espaço para otimização do sistema, para se obter erros ainda menores. Por fim, o trabalho [36] visa a implantação de um *software* de um sistema de comunicação que tem por objetivo se comunicar com um satélite na camada LEO. Os testes demonstraram o funcionamento correto do receptor, mas houve diversos erros de recebimento de quadros. O autor demonstra diversos motivos que justificam esses erros e entre eles reconhece a necessidade de melhoria no *software*. Portanto, é perceptível as diversas áreas existentes para pesquisa relacionada a SDR e comunicações aditivas.

V. CONCLUSÃO

Esse trabalho descreveu os problemas relacionados ao aumento do número de pequenos satélites e demonstrou a tecnologia de SDR como uma possível solução para problemas em comunicações via satélite. Considerando a sua tendência de crescimento, o SDR é usado não apenas para contornar

a escassez de frequência, mas também em outras situações como localizar um satélite e transmissão de imagem. O SDR mostrou-se capaz de realizar diversas otimizações como eficiência energética, melhoria na taxa de dados, adaptabilidade, entre outras. Apresentou-se uma visão geral dessa tecnologia, aplicações e pesquisas atuais que abordaram o seu uso em diversos tipos de sistemas e comunicações. Revisaram-se e discutiram-se alguns dos principais desafios de pesquisa, questões a serem investigadas e tópicos a serem aprimorados, visando promover a adoção de SDRs em aplicações espaciais e identificar uma série de oportunidades de pesquisas promissoras envolvendo essa tecnologia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) pelo apoio financeiro e ao Laboratório de Segurança Cibernética e Internet das Coisas (CSI Lab) do Inatel por todo o suporte técnico oferecido.

REFERÊNCIAS

- [1] Agência Brasil, “Brasil tem 134 Milhões de Usuários de Internet, Aponta Pesquisa,” [Online]. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-05/brasil-tem-134-milhoes-de-usuarios-de-internet-aponta-pesquisa>, Acesso: 2021-10-29.
- [2] A. Miller, “Como a Internet via Satélite vai Ajudar a Conectar o Mundo,” [Online]. Disponível em: <https://www.viasat.com/pt-br/sobre-nos/sala-de-imprensa/blog/como-a-internet-via-satelite-vai-ajudar-a-conectar-o-mundo/>, Acesso: 2021-10-29.
- [3] C. B. Chad Anderson, Corentin Guillo, “Small is the New Big,” *Satellite Catapult, Harwell Oxford*, pp. 165–171.
- [4] S. Bandyopadhyay, G. P. Subramanian, R. Foust, D. Morgan, S. J. Chung, and F. Y. Hadaegh, “A Review of Impending Small Satellite Formation Flying Missions,” *Proceedings of the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2015.
- [5] A. Lewin, “Market Growth Potential for Small Satellites: An Industry View,” *Smaller Satellites: Bigger Business? Concepts, Applications and Markets for Micro/Nanosatellites in a New Information World*, M. Rycroft and N. Crosby, pp. 165–171, 2002.
- [6] M. R. Maheshwarappa, “Software Defined Radio (SDR) Architecture For Concurrent Multi-satellite Communications,” 2017.
- [7] E. Buchen, “Spaceworks 2014 Nano/microsatellite Market Assessment,” 2014.
- [8] Moses Browne Mwakyanjala, Luleã, Reza Emami, Jaap van de Beek, “Software-defined radio baseband for satellite management systems,” setembro de 2017.
- [9] M. R. Maheshwarappa and C. P. Bridges, “Software Defined Radios for Small Satellites,” *2014 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS)*, pp. 172–179, 2014.
- [10] The Wireless Innovation Forum, “What is Software Defined Radio?” [Online]. Disponível em: https://www.wirelessinnovation.org/index.php?option=com_contentview=articleid=63:Introduction_to_SDRcatid=19:site-contentItemid=77, Acesso: 2021-10-27.
- [11] M. Mwakyanjala, “Software Defined Radios for Satellite Ground Station,” *Technical report*, 2020.
- [12] ReportBuyer, “Software Defined Radio (SDR) - Global Market Trajectory Analytics,” [Online]. Disponível em: https://www.researchandmarkets.com/research/pc9x7g/software_defined, Acesso: 2021-10-29.
- [13] Rami Akeela, Behnam Dezfouli, “Software-defined radios: Architecture, state-of-the-art, and challenges,” *Networking and Internet Architecture*, 18 de abril 2018.
- [14] Israat Tanzeena Haque, Nael Abu-Ghazaleh, “Wireless software defined networking: A survey and taxonomy,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2713–2737, 2016.
- [15] Syed Danial Ali Shah, Mark A. Gregory, Shuo Li, “Cloud-native network slicing using software defined networking based multi-access edge computing: A survey,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 10903–10924, 2021.
- [16] Gianmarco Baldini, Taj Sturman, Abdur Rahim Biswas, Ruediger Leschhorn, Gyozo Godor, Michael Street, “Security aspects in software defined radio and cognitive radio networks: A survey and a way ahead,” vol. 14, no. 2, pp. 355–379, 2012.
- [17] Daniel F. Macedo, Dorgival Guedes, Luiz Vieira, Marcos Vieira, Michele Nogueira, “Programmable networks — from software-defined radio to software-defined networking,” vol. 17, no. 2, pp. 1102–1125, 2015.
- [18] Tao Chen, Marja Matinmikko, Xianfu Chen, Xuan Zhou, Petri Ahokangas, “Software defined mobile networks: concept, survey, and research directions,” vol. 53, no. 11, pp. 126–133, 2015.
- [19] Xiangchen Lu, Liang Chen, Nan Shen, Lei Wang, Zhenhang Jiao, Ruizhi Chen, “Decoding PPP corrections from BDS B2b signals using a software-defined receiver: An initial performance evaluation,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 6, pp. 7871–7883, 15 de março de 2021.
- [20] Fabio Principe, Giacomo Bacci, Filippo Giannetti, Marco Luise, “Software-defined radio technologies for GNSS receivers: A tutorial approach to a simple design and implementation,” p. 27, 2011.
- [21] F. Pinto, F. Afghah, R. Radhakrishnan, and W. Edmonson, “Software defined radio implementation of DS-CDMA in inter-satellite communications for small satellites,” in *2015 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*. IEEE, 2015, pp. 1–6.
- [22] Stoytcho Gultchev, Klaus Moessner, Duminda Thilakawardana, Terence E. Dodgson, Rahim Tafazolli, “Evaluation of software defined radio technology,” 2006.
- [23] Thomas J. Kacpura, Joseph A. Downey, Jeffery R. Anderson, Keith Baldwin, “Evolution of a reconfigurable processing platform for a next generation space software defined radio,” pp. 1–10, 2012.
- [24] T. Rossi, M. De Sanctis, E. Cianca, C. Fragale, M. Ruggieri, and H. Fenech, “Future space-based communications infrastructures based on high throughput satellites and software defined networking,” in *2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 2015, pp. 332–337.
- [25] Krisjani S. Angkasa, James S. Border, Courtney B. Duncan, M. Michael Kobayashi, Zaid J. Towfic, Thaddaeus J. Voss, Peter W. Kinman, “Regenerative ranging for jpl software-defined radios,” vol. 34, no. 9, pp. 46–55, 2019.
- [26] Zhen Gao, Jinhua Zhu, Tong Yan, Linghua Guo, Xiangping Chen, Yinqiao Li, Xiaolei Wan, “Fault tolerant design of large-scale digital beam forming in SRAM-FPGAs for software defined satellite platforms,” vol. 17, no. 7, pp. 224–235, 2020.
- [27] Edwin GW Peters, Craig R. Benson, “A doppler correcting software defined radio receiver design for satellite communications,” vol. 35, no. 2, pp. 34–48, 2020.
- [28] Maheshwarappa, Mamatha Ramapura and Bowyer, Mark D. J. and Bridges, Christopher P., “Improvements in CPU and FPGA performance for small satellite SDR applications,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 1, pp. 310–322, 2017.
- [29] Mamatha R. Maheshwarappa, Mark DJ Bowyer, Christopher P. Bridges, “A reconfigurable SDR architecture for parallel satellite reception,” vol. 33, no. 11, pp. 40–53, 2018.
- [30] Taixin Li, Huachun Zhou, Hongbin Luo, Qi Xu, Si Hua, Bohao Feng, “Service function chain in small satellite-based software defined satellite networks,” vol. 15, no. 3, pp. 157–167, 2018.
- [31] Xin Cai, Mingda Zhou, Tian Xia, Wai H. Fong, Wing-Tsz Lee, Xinming Huang, “Low-power SDR design on an fpga for intersatellite communications,” vol. 26, no. 11, pp. 2419–2430, 2018.
- [32] B. Yang, Y. Wu, X. Chu, and G. Song, “Seamless handover in software-defined satellite networking,” *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 9, pp. 1768–1771, 2016.
- [33] Luca Boero, Mario Marchese, Fabio Patrone, “The impact of delay in software-defined integrated terrestrial-satellite networks,” vol. 15, no. 8, pp. 11–21, 2018.
- [34] A. Platonov, “Energy saving adaptive sdr transmitters for small satellites and their metrological characteristics,” pp. 468–472, 2018.
- [35] Panagiotis Ioannis Theoharis, Raad Raad, Faisal Tubbal, Muhammad Usman Ali Khan, Sining Liu, “Software-defined radios for cubesat applications: A brief review and methodology,” vol. 2, no. 1, pp. 10–16, 2020.
- [36] J. Skarzynski, M. Darmetko, S. Kozłowski, and K. Kurek, “SDR implementation of the receiver of adaptive communication system,” *Radio Science*, vol. 51, no. 4, pp. 344–351, 2016.
- [37] Sebastian Kozłowski, Krzysztof Kurek, Jacek Skarżyński, Katarzyna Szczygielska, Marcin Darmetko, “Investigation on adaptive satellite communication system performance using SDR technique,” in *2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)*, 2018, pp. 363–366.

- [38] “Sistema de recepção de imagens meteorológicas usando rádio definido por software (SDR),” in *2017 IEEE Second Equador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, 2017, pp. 1–6.
- [39] A. K. Jha and H. Shekhar, “A SDR based trans-receiver for communication of image and video,” in *2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs)*, 2016, pp. 249–253.
- [40] I. Lucresi, A. Di Carlofelice, and P. Tognolatti, “SDR-based system for satellite ranging measurements,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 31, no. 1, pp. 8–13, 2016.
- [41] R. Nivin, J. S. Rani, and P. Vidhya, “Design and hardware implementation of reconfigurable nano satellite communication system using FPGA based SDR for FM/FSK demodulation and BPSK modulation,” in *2016 International Conference on Communication Systems and Networks (ComNet)*, 2016, pp. 1–6.
- [42] Yuanguo Bi, Guangjie Han, Shuang Xu, Xingwei Wang, Chuan Lin, Zhibo Yu, Peiyao Sun, “Software defined space-terrestrial integrated networks: Architecture, challenges, and solutions,” vol. 33, no. 1, pp. 22–28, 2019.
- [43] Michel Chino, Hector Miyashiro, Jorge L. Arizaca, “Implementation of an adaptive control system of the power transmitted through the estimated snr, over sdr platform,” pp. 1–4, 2019.
- [44] Nariman A. Salam Bauomy, Eslam Ahmed Elbeh, “Design of SDR simulation for wireless communication between ground station and cubesat implemented by labview,” pp. 60–63, 2020.
- [45] T. Li, H. Zhou, H. Luo, and S. Yu, “Service: A software defined framework for integrated space-terrestrial satellite communication,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 3, pp. 703–716, 2018.
- [46] X. Cai, M. Zhou, T. Xia, W. H. Fong, W.-T. Lee, and X. Huang, “Low-power sdr design on an fpga for intersatellite communications,” *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 26, no. 11, pp. 2419–2430, 2018.
- [47] M. R. Maheshwarappa, M. D. Bowyer, and C. P. Bridges, “A reconfigurable sdr architecture for parallel satellite reception,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 33, no. 11, pp. 40–53, 2018.
- [48] A. Platonov, “Energy saving adaptive sdr transmitters for small satellites and their metrological characteristics,” in *2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, 2018, pp. 468–472.