PRÊMIO INOVAR APTEL | SNT XXII – RIO DE JANEIRO

# Plataforma Aérea baseada em ARP e SDR para Medição, Caracterização e Diagnóstico de Sistemas de Telecomunicações

**Proposta do projeto:** Desenvolvimento de uma plataforma aérea de **captura de RF**, reconfigurável por software, que integra SDR, GNSS de alta precisão e IMU para associar cada medição à posição e à orientação da ARP, permitindo utilizar uma mesma arquitetura para **caracterização do canal de propagação, inspeção de sistemas irradiantes e localização de transmissores fixos**.

**Marlon da Silva Borges**

Universidade Federal Fluminense (UFF) • Marinha do Brasil

marlon_borges@id.uff.br

Outubro de 2026

# Visão do projeto

O projeto desenvolve uma **plataforma de aquisição de RF portátil** capaz de coletar, sincronizar e processar informações de potência recebida, posição e orientação. O objetivo é transformar um ARP (Aeronave Remotamente Pilotada) em uma plataforma de medição programável, permitindo que diferentes tarefas sejam executadas predominantemente por alterações de software, processamento e perfil de voo.

**Conceito de inovação:** em vez de construir um instrumento dedicado para cada tarefa, utiliza-se uma arquitetura comum de sensores e aquisição e adapta-se a metodologia de voo e o pós-processamento à aplicação desejada.

## Problema que a solução busca enfrentar

- necessidade de medições de RF em posições de difícil acesso ou em diferentes altitudes;
- associação confiável entre potência recebida e geometria real do enlace;
- influência da orientação e do diagrama das antenas sobre a interpretação das medições;
- custo e baixa flexibilidade de instrumentações especializadas para campanhas de campo;
- necessidade de uma mesma plataforma atender a diferentes tarefas de medição e diagnóstico.

# Arquitetura tecnológica

O protótipo integra um **LimeSDR Mini**, um **Raspberry Pi 5**, um receptor **GNSS RTK LC29H** e uma **IMU BNO055**, além de incorporar um modem 4G para acesso remoto em tempo real. O projeto e a validação experimental da plataforma foram apresentados no **Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2026)** [1]. Como o artigo ainda aguarda publicação nos anais do evento, uma cópia do manuscrito foi disponibilizada como material complementar a este projeto. A Figura 1 apresenta a arquitetura do sistema de recepção e o protótipo desenvolvido.

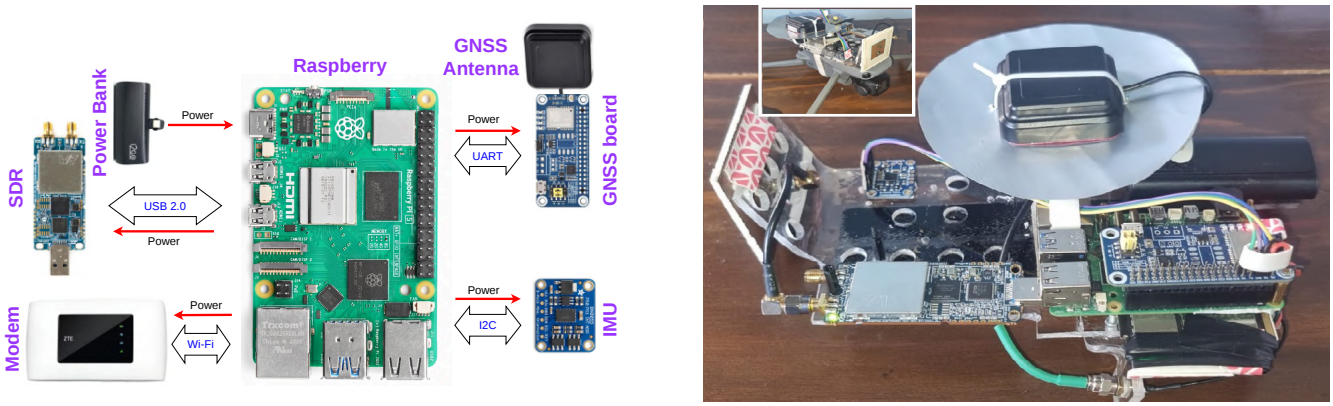



**Figura 1:** Plataforma de recepção desenvolvida para integração à ARP: (a) arquitetura dos módulos embarcados e suas interfaces de comunicação; e (b) protótipo desenvolvido, integrando aquisição de RF, processamento, posicionamento e orientação em uma única plataforma. Maior detalhamento disponível em [1]

.

**Fluxo de dados.** O SDR fornece a informação de RF; o GNSS fornece latitude, longitude e altitude; e a IMU registra *yaw*, *pitch* e *roll*. Os dados são temporalmente associados para formar um conjunto sincronizado de **RF + posição + orientação**. A Figura 2 ilustra o processo de sincronização e fusão dessas diferentes fontes de dados.

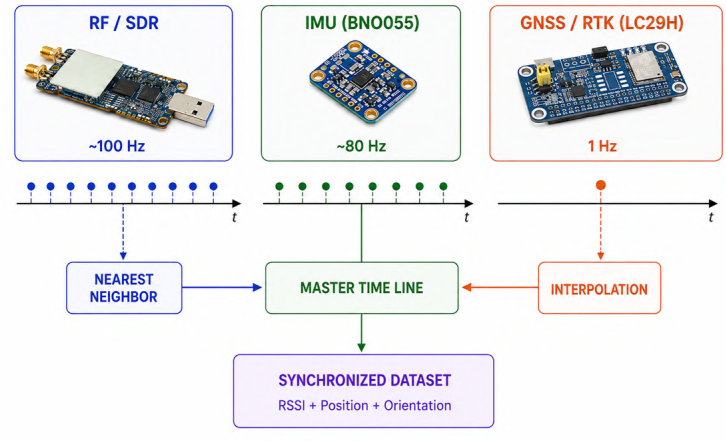


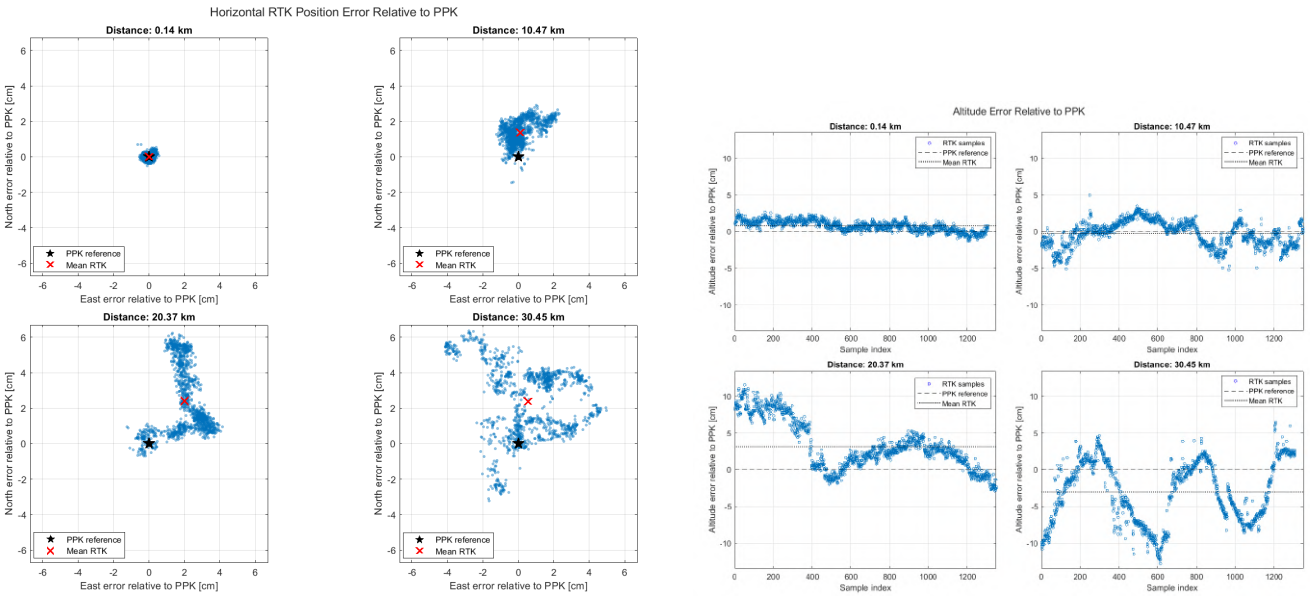

**Figura 2:** Diagrama de sincronização e fusão dos dados dos diferentes sensores da plataforma de recepção.

## Posicionamento de Precisão

A plataforma integra um módulo GNSS com suporte a **RTK (Real-Time Kinematic)**, que utiliza correções recebidas em tempo real via **NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol)** para obter posicionamento com precisão centimétrica. O sistema também registra observações GNSS brutas para processamento posterior por **PPK (Post-Processed Kinematic)**, permitindo obter soluções de alta precisão mesmo na ausência de correções em tempo real.

Para validar o desempenho do posicionamento RTK, foram realizados experimentos utilizando correções da estação **RJNI**, localizada na UFF e integrante da **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC/IBGE)**. Em cada ensaio, a plataforma permaneceu estacionária por aproximadamente 25 minutos, permitindo avaliar a dispersão das coordenadas estimadas e os desvios das soluções RTK em relação às soluções de referência obtidas por pós-processamento, para diferentes distâncias da estação de referência.

A Figura 3 apresenta os erros horizontal e vertical obtidos em pontos localizados a aproximadamente 0,14, 10,47, 20,37 e 30,45 km da estação RJNI.




**(a) Erro horizontal** **(b) Erro de altitude**

**Figura 3:** Caracterização experimental do posicionamento RTK em diferentes distâncias da estação de referência RJNI: (a) erro horizontal e (b) erro da altura elipsoidal, ambos calculados em relação à solução de referência obtida por pós-processamento.

O RMS do erro horizontal foi de 0,27 cm, 1,68 cm, 3,81 cm e 3,72 cm para pontos situados, respectivamente, a 0,14 km, 10,47 km, 20,37 km e 30,45 km da estação RJNI. Mesmo no ponto mais distante, localizado a aproximadamente 30 km da estação de referência, o percentil de 95% do erro horizontal permaneceu em 6,38 cm. O erro vertical apresentou maior sensibilidade ao aumento da distância até a estação RJNI, alcançando RMS de 5,22 cm e percentil de 95% de 9,66 cm no ponto mais distante.

Os resultados demonstram que, nas condições avaliadas, o sistema mantém precisão da ordem de poucos centímetros mesmo quando operado a dezenas de quilômetros da estação de referência. Essa característica é particularmente relevante para aplicações nas quais as medições de RF precisam ser associadas com precisão à geometria tridimensional do enlace.

## Validação experimental da plataforma

A plataforma foi submetida a diferentes ensaios experimentais com o objetivo de validar a integração entre os subsistemas e verificar a consistência das medições obtidas. Inicialmente, foi realizado um ensaio controlado de integração entre **RF, GNSS e IMU**, no qual a orientação da antena receptora foi variada enquanto eram registrados simultaneamente o RSSI, a posição e os ângulos de orientação. Os resultados demonstraram que a variação da potência recebida acompanhava o comportamento esperado a partir da orientação da antena e de seu diagrama de radiação.

Em seguida, foi realizada uma campanha de campo com o sistema embarcado na ARP, na qual foram adquiridas medidas de potência ao longo de uma trajetória radial em relação ao transmissor. As medições apresentaram comportamento consistente com os modelos de propagação em Espaço Livre (*Free-Space Path Loss* – FSPL) e Dois Raios (*Two-Ray*), contribuindo para a validação do sistema de aquisição e processamento desenvolvido.

Esses experimentos validaram o funcionamento integrado da plataforma e sua capacidade de associar medições de RF à posição e à orientação espacial do sistema receptor. A metodologia, os procedimentos experimentais e os resultados detalhados dessa etapa de validação são apresentados em [1].

## Aplicação 1 – Sondagem de canal em faixa estreita

A plataforma pode ser utilizada como um sistema de **sondagem de canal em faixa estreita**, permitindo caracterizar experimentalmente como a potência recebida varia em função da distância, da altitude e da geometria entre transmissor e receptor. A associação das medidas de RF com as informações de posição e orientação da ARP permite analisar os mecanismos de propagação presentes no ambiente, comparar os resultados com modelos existentes e, quando necessário, obter dados experimentais para o desenvolvimento ou ajuste de modelos específicos para um determinado cenário.

Como demonstração dessa aplicação, foi realizada uma campanha de medição em **3,5 GHz** sobre água. O transmissor foi instalado em terra e configurado para transmitir uma onda contínua (*Continuous Wave* – CW). A antena transmissora foi posicionada a aproximadamente 4,15 m acima da superfície da água e orientada de forma que seu *boresight* acompanhasse a direção prevista para o voo.

O sistema receptor foi embarcado na ARP, que se deslocou sobre a água ao longo da direção de *boresight* da antena transmissora, alcançando uma distância de aproximadamente 1 km do transmissor. Durante o trecho de retorno da ARP, trecho este utilizado para análise, a ARP foi mantida a uma altura aproximadamente constante de 12,5 m em relação ao nível da água. A Figura 4 apresenta a trajetória realizada, juntamente com a orientação da ARP registrada durante o voo.

A partir das medições de potência e das posições registradas pelo sistema, foi calculada a perda de percurso em função da distância entre transmissor e receptor. A Figura 5 apresenta o resultado experimental e sua comparação com os modelos de propagação em Espaço Livre (*Free-Space Path Loss* – FSPL) e Dois Raios (*Two-Ray*).

Os resultados apresentaram oscilações periódicas da potência recebida com boa correspondência ao comportamento previsto pelo modelo de Dois Raios. Nesse cenário, o sinal recebido é fortemente influenciado pela combinação entre o percurso direto e o percurso refletido pela superfície da água, produzindo regiões sucessivas de interferência construtiva e destrutiva ao longo da trajetória.

O experimento demonstrou, portanto, a capacidade da plataforma de registrar espacialmente fenômenos de propagação e fornecer dados experimentais para avaliação de modelos de canal.

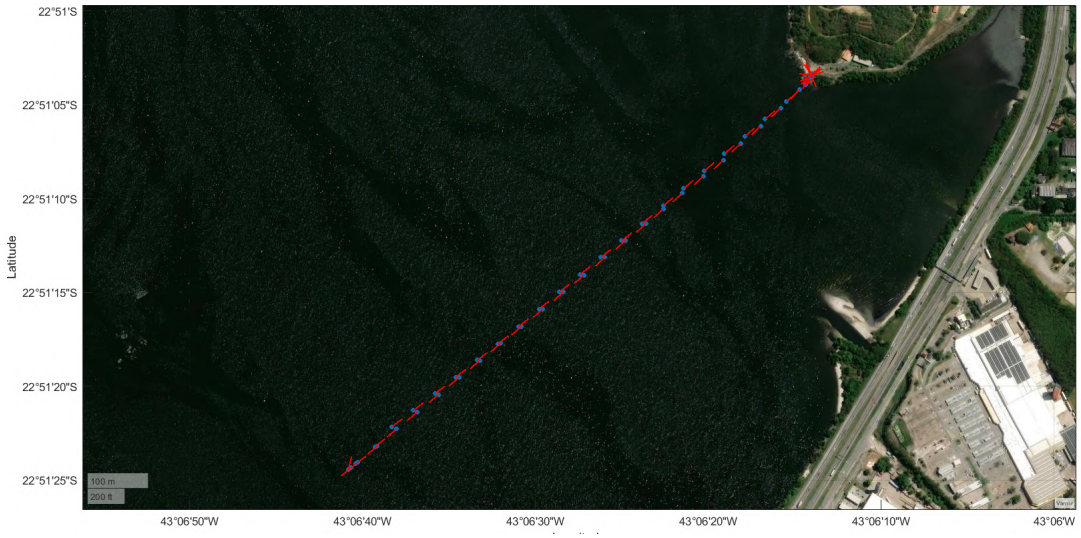



**Figura 4:** Trajetória da ARP durante o experimento de sondagem do canal sobre a superfície da água. Os vetores indicam a orientação do sistema receptor em relação ao norte verdadeiro.

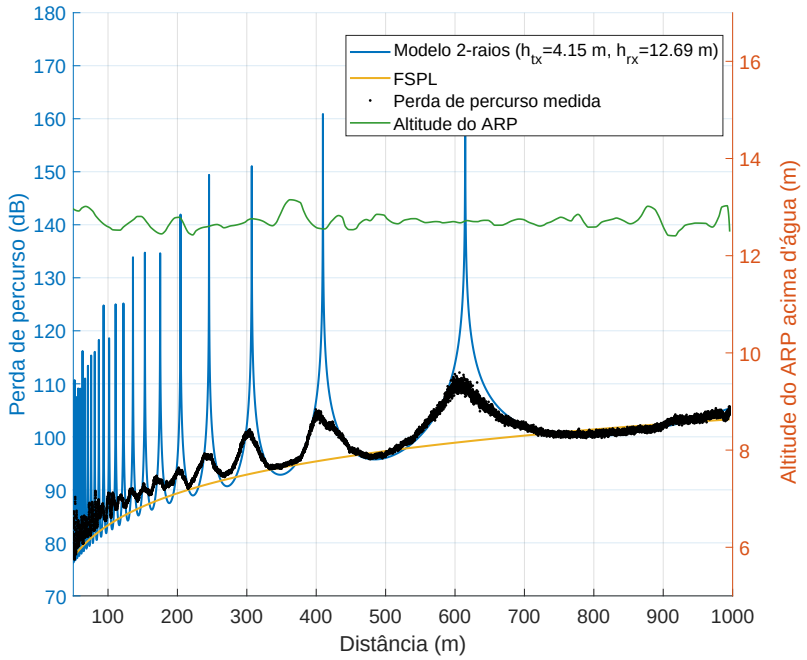



**Figura 5:** Perda de percurso medida ao longo da trajetória sobre a água e comparação com os modelos de propagação FSPL e Dois Raios. A altitude medida da ARP é apresentada no eixo vertical secundário.

## Aplicação 2 – Inspeção aérea de sistemas irradiantes

A caracterização de sistemas irradiantes por meio de ARP tem sido investigada como alternativa às técnicas convencionais de medição, especialmente em situações nas quais se deseja avaliar antenas instaladas em seus ambientes reais de operação [2], [3]. Nesse contexto, outra aplicação investigada neste projeto é a medição do diagrama de irradiação de antenas utilizando a ARP como plataforma de varredura. A proposta é deslocar o receptor por uma superfície à frente da antena sob teste, associando cada amostra de potência à posição tridimensional correspondente.

Para validação da metodologia, foi construída uma antena de referência (*Antenna Under Test* – AUT) composta por duas antenas *patch*, configuradas de forma a produzir um diagrama de irradiação com múltiplos lóbulos bem definidos. Antes dos ensaios com a ARP, a AUT foi caracterizada utilizando uma plataforma de medição angular controlada por motores de passo, permitindo variar os ângulos de azimute e elevação. A Figura 6 apresenta a AUT instalada nessa plataforma de caracterização.

A caracterização permitiu obter o diagrama de irradiação da AUT em função dos ângulos de azimute e elevação. A Figura 7 apresenta o diagrama bidimensional obtido experimentalmente e seu corte no plano de elevação igual a

0°. A presença de múltiplos lóbulos bem definidos fornece uma referência adequada para avaliar a capacidade da metodologia de reconstruir espacialmente o diagrama da antena.

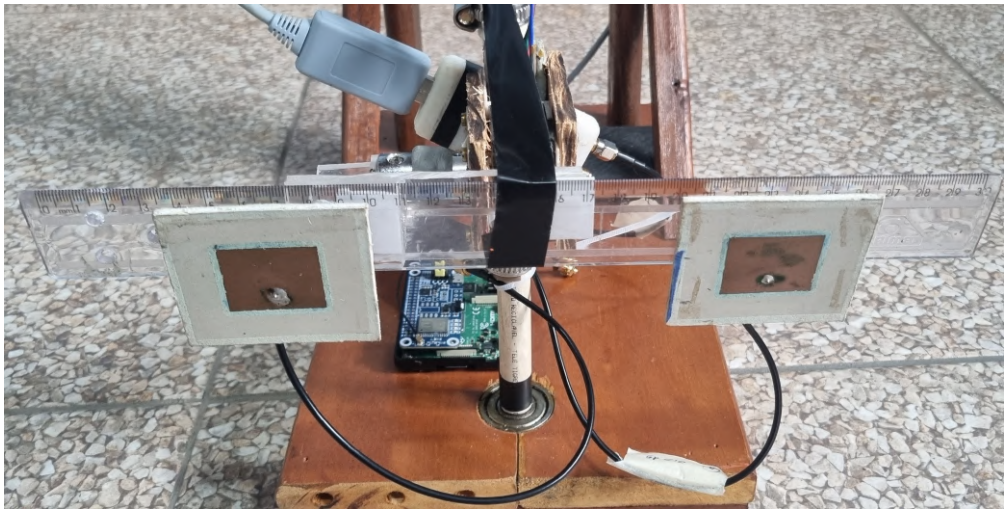
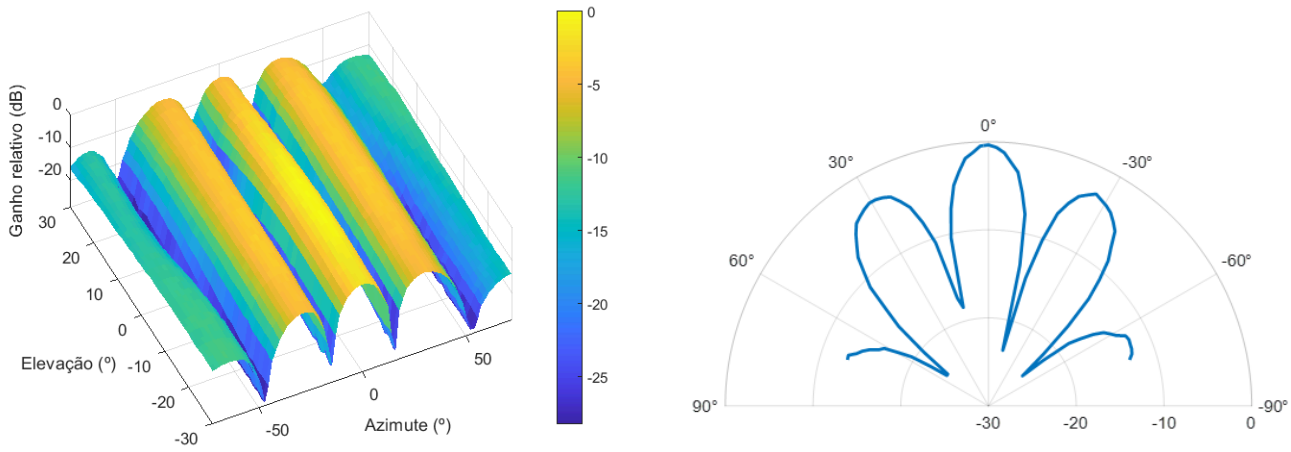


**Figura 6:** Antena sob teste (AUT), composta por duas antenas *patch*, instalada na plataforma de caracterização angular utilizada para obtenção do diagrama de irradiação de referência.




**(a) Diagrama em azimute e elevação** **(b) Corte para elevação = 0°**

**Figura 7:** Diagrama de irradiação de referência da AUT obtido com a plataforma controlada por motores de passo: (a) distribuição do ganho relativo em função dos ângulos de azimute e elevação; e (b) corte azimutal correspondente ao plano de elevação igual a 0°.

Para realizar a caracterização aérea, a AUT foi mantida em posição fixa e a ARP, transportando a plataforma de recepção, executou uma trajetória de varredura à frente da antena. A distância entre a AUT e a região de varredura foi definida de forma que as medições fossem realizadas em campo distante, permitindo associar cada posição do receptor a uma direção angular de observação da antena. A definição da região de medição e das condições de voo constitui um aspecto importante desse tipo de caracterização [3].

Durante o voo, a ARP percorreu sucessivas trajetórias aproximadamente paralelas, em diferentes alturas, formando uma superfície de amostragem à frente da AUT. Em cada ponto da trajetória, a plataforma registrou simultaneamente a potência recebida e a posição tridimensional do ponto de referência da antena receptora. A Figura 8 ilustra o procedimento utilizado.

O resultado direto da aquisição é uma nuvem de amostras espacialmente referenciadas, na qual cada medida de potência está associada às coordenadas tridimensionais da ARP. A Figura 9 apresenta as amostras obtidas durante um dos ensaios, com a escala de cores representando o RSSI medido em cada posição. A própria distribuição espacial da potência já permite observar regiões de máximos e mínimos correspondentes aos diferentes lóbulos da AUT.

Para reconstruir o diagrama de irradiação, as coordenadas cartesianas de cada amostra são transformadas em **azimute e elevação em relação à AUT**. Dessa forma, as medidas de potência adquiridas ao longo da trajetória da ARP passam a representar amostras do ganho relativo da antena em diferentes direções angulares. Após a normalização e o processamento das amostras, é obtida uma estimativa bidimensional do diagrama de irradiação.

A Figura 10 compara o diagrama reconstruído a partir da varredura realizada pela ARP com o diagrama de referência




**Figura 8:** Procedimento de varredura aérea para caracterização do diagrama de irradiação. A AUT permanece fixa enquanto a ARP, transportando a plataforma receptora, percorre uma superfície de amostragem localizada em sua região de campo distante.

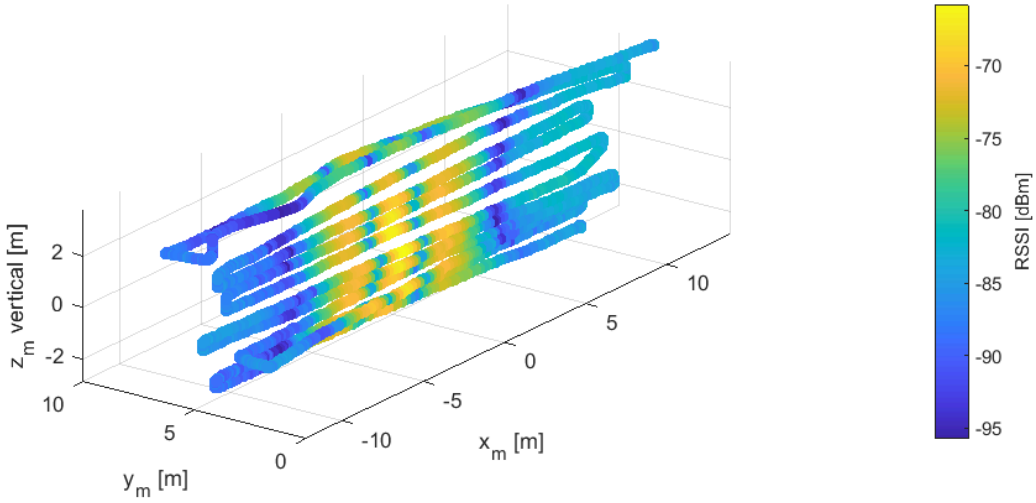
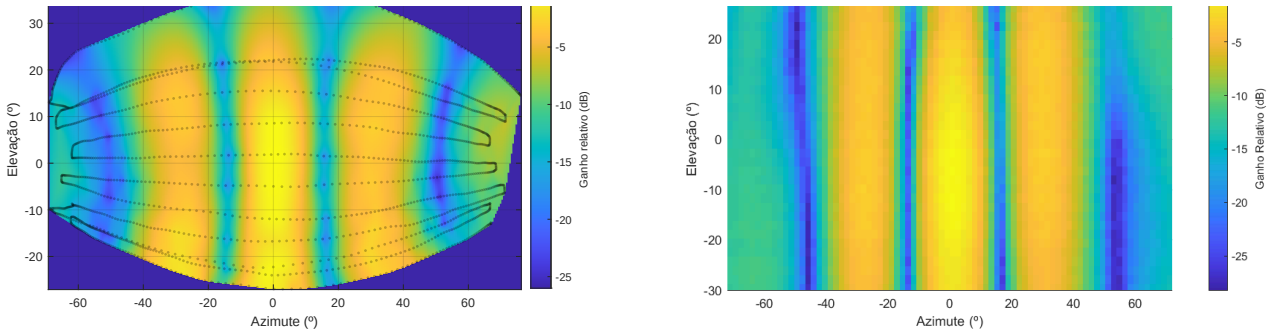



**Figura 9:** Amostras obtidas durante a varredura aérea no sistema de coordenadas cartesianas. A posição do transmissor foi definida como origem do sistema de coordenadas.

previamente obtido pela plataforma de caracterização angular.

Observa-se que a reconstrução aérea reproduz a estrutura geral do diagrama da AUT, incluindo a posição dos principais lóbulos e regiões de menor ganho, validando a aplicabilidade do receptor para este fim.




**(a) Diagrama de radiação reconstruído** **(b) Diagrama de radiação de referência**

**Figura 10:** Comparação entre os diagramas de irradiação: (a) diagrama reconstruído com interpolação a partir das amostras adquiridas durante a varredura com a ARP; e (b) diagrama de referência obtido previamente com a plataforma de caracterização angular.

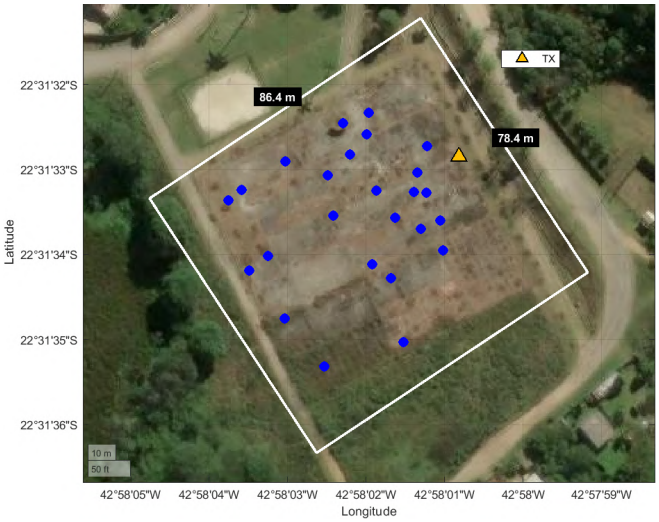
# Aplicação 3 – Localização de transmissores

A utilização de ARPs para localização de emissores de radiofrequência tem sido investigada por meio da aquisição de medidas de potência recebida em diferentes posições, associadas às coordenadas espaciais da aeronave [4], [5]. Neste projeto, a mesma arquitetura foi adaptada para uma terceira aplicação: a localização de transmissores a partir da estimação da direção de chegada do sinal (Angle of Arrival – AoA). Para isso, utiliza-se uma antena direcional embarcada na ARP, explorando a variação da potência recebida em função da orientação da aeronave.

Em cada posição de varredura, a ARP permanece aproximadamente estacionária e realiza uma rotação em torno do seu eixo vertical. Durante o giro, as medidas de potência recebida são associadas ao *heading* registrado pela IMU, produzindo um perfil angular de RSSI [6]. A análise desse perfil, em conjunto com o diagrama de irradiação conhecido da antena receptora, permite estimar a direção de chegada do sinal em cada posição.

Para avaliar experimentalmente essa abordagem, foram realizadas varreduras em diferentes posições distribuídas na área do experimento. Como cada estimativa de AoA é associada às coordenadas GNSS da respectiva posição de varredura, as direções estimadas a partir de múltiplos pontos podem ser combinadas para determinar a posição do transmissor.

A Figura 11 apresenta o cenário utilizado na campanha experimental.




**(a) Posições de varredura**



**(b) Configuração experimental**

**Figura 11:** Campanha experimental para localização do transmissor: (a) distribuição das posições de varredura em relação ao transmissor (TX); e (b) configuração experimental durante a realização das medições.

A Figura 12 apresenta um exemplo do processamento realizado em uma das posições de varredura. Esta curva refere-se a posição P20 da Figura 13 que obteve um dos maiores erros de estimativa de AoA. Durante os giros da ARP, são obtidas diversas amostras de potência para diferentes ângulos de *heading*. Essas amostras são agrupadas em função do ângulo e utilizadas para determinar uma curva média característica do RSSI ao longo da varredura angular.

A direção de chegada é então estimada a partir dessa curva, utilizando um ajuste com o diagrama de irradiação conhecido da antena receptora. No exemplo apresentado, o AoA estimado foi de 9,90°, enquanto a direção real entre a posição de varredura e o transmissor era de 16,69°.

O mesmo procedimento foi aplicado às diferentes posições de varredura da campanha. Dessa forma, cada posição fornece uma estimativa independente de AoA, definindo uma direção no plano horizontal a partir da posição conhecida da ARP. A combinação das direções obtidas em múltiplos pontos permite então estimar a posição do transmissor.

A Figura 13 apresenta conjuntamente os resultados obtidos nas diferentes posições. As linhas tracejadas representam as direções estimadas de chegada do sinal em cada ponto de varredura, enquanto os marcadores indicam as posições utilizadas no processamento. Para avaliação experimental, são apresentadas também a posição real do transmissor e a posição estimada pelo método de localização.

A combinação das estimativas de AoA obtidas nas diferentes posições permitiu localizar o transmissor com **erro de 4,17 m**, utilizando todas as varreduras realizadas. O resultado demonstra o potencial da plataforma integrada de RF, GNSS e IMU para aplicações de localização de emissores.

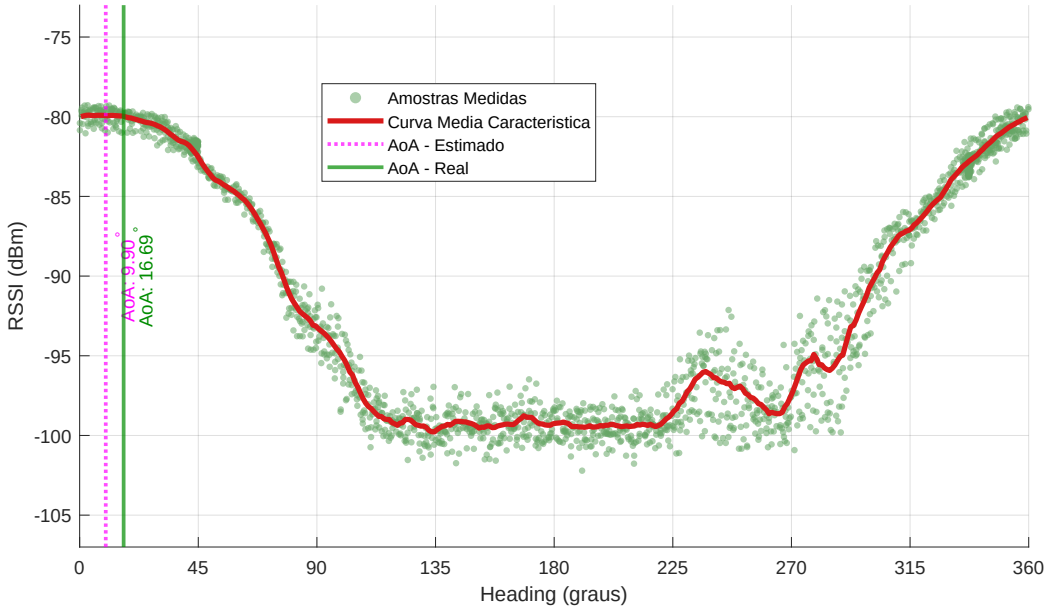



**Figura 12:** Exemplo de varredura angular realizada em uma das posições de medição.

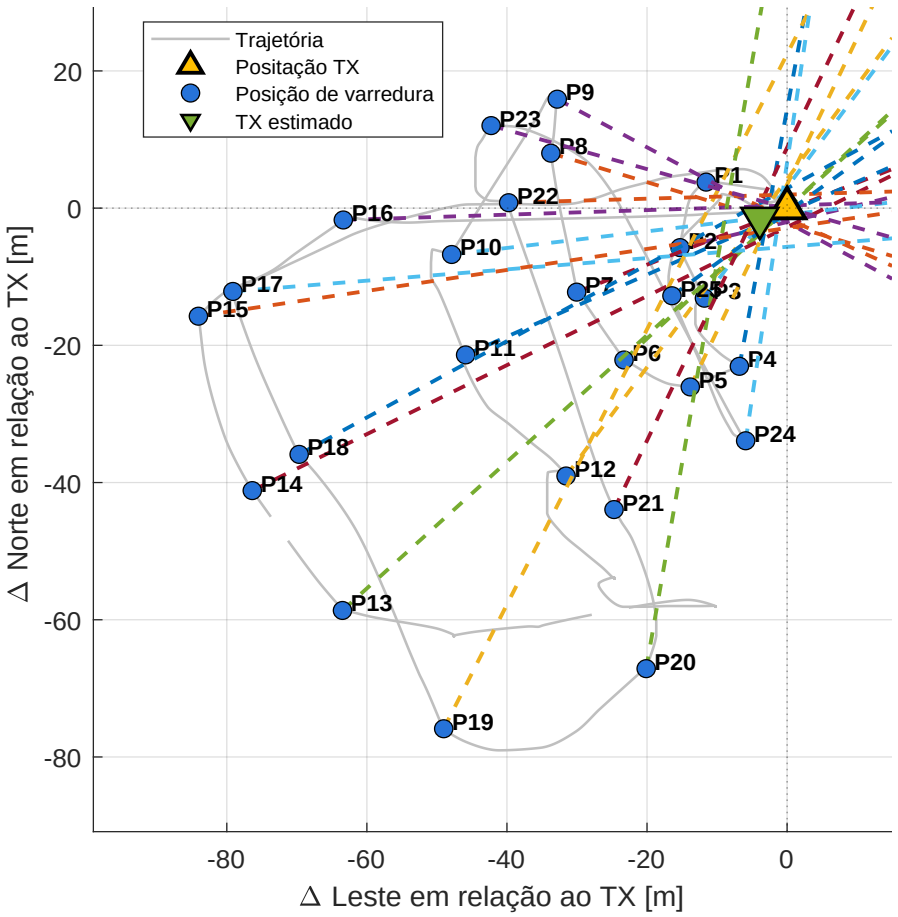
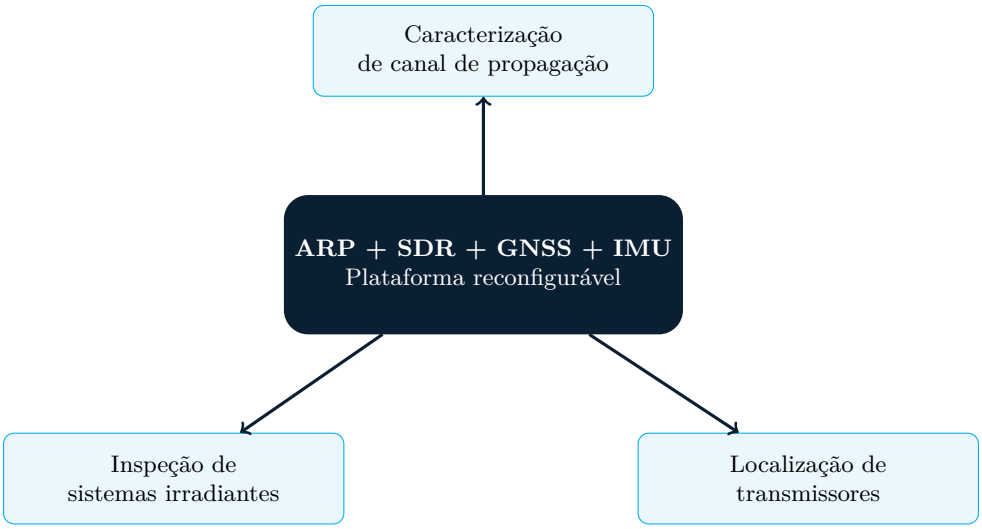



**Figura 13:** Resultado experimental da localização do transmissor utilizando múltiplas estimativas de AoA. As linhas tracejadas representam as direções estimadas nas diferentes posições de varredura. São indicadas também a posição real do transmissor (TX) e a posição estimada a partir do conjunto de medições.

# Versatilidade, economicidade e potencial de evolução

## Uma plataforma, múltiplas aplicações




## Economicidade

O custo dos principais módulos da plataforma de recepção foi estimado em aproximadamente **R$ 9 mil**, considerando valores de aquisição por **pessoa física no mercado brasileiro**. A estimativa inclui SDR, computador embarcado, GNSS, IMU, modem 4G e sistema de alimentação. O valor não inclui a ARP, antenas desenvolvidas, acessórios, mão de obra, instrumentos de laboratório ou infraestrutura de apoio e, portanto, representa o custo aproximado dos principais módulos do *payload*, e não o custo total de implantação da solução.

Como a plataforma de medição desenvolvida é independente da ARP, o sistema pode ser facilmente integrado a uma aeronave diferente daquela utilizada neste projeto, permitindo, inclusive, o aproveitamento de uma ARP já disponível pelo interessado.

## Potencial de evolução

- ampliar as campanhas experimentais para ambientes urbanos, marítimos e industriais;
- automatizar e otimizar trajetórias e rotinas de aquisição, aumentando a repetibilidade e a eficiência das medições, inclusive por meio de estratégias de planejamento adaptativo de voo [7];
- integrar a plataforma a ARPs com protocolos de controle abertos, permitindo maior integração entre o sistema de medição e o controle de voo;
- incorporar SDRs com maiores taxas de amostragem e largura de banda de aquisição, ampliando a capacidade de caracterização e análise do canal de propagação.

**A inovação central não está apenas em medir RF com um drone, mas em transformar a ARP em uma plataforma de instrumentação de telecomunicações reconfigurável por software.**

# Referências

[1] M. da S. Borges et al., "Design and Validation of a Low-Cost 5G UAV-SDR Narrowband Channel Sounding System," em *XLIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2026)*, Artigo apresentado; publicação nos anais pendente. Manuscrito disponível como material complementar.

[2] M. García-Fernández et al., "Antenna Diagnostics and Characterization Using Unmanned Aerial Vehicles," *IEEE Access*, v. 5, pp. 23 563–23 575, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2754985

[3] J. Núñez et al., "Analysis of the Operating Conditions for UAV-Based On-Board Antenna Radiation Pattern Measurement Systems," *PLOS ONE*, v. 16, n. 2, e0245004, 2021. DOI: 10.1371/journal.pone.0245004

[4] S. Moro et al., "Experimental UAV-Aided RSSI Localization of a Ground RF Emitter in 865 MHz and 2.4 GHz Bands," em *2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Spring)*, IEEE, 2022. DOI: 10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860875

[5] V. Teeda et al., "Differentiation and Localization of Ground RF Transmitters Through RSSI Measures From a UAV," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 74, n. 1, pp. 1000–1009, 2025. DOI: 10.1109/TVT.2024.3458416

[6] J.-R. Jiang et al., "ALRD: AoA Localization with RSSI Differences of Directional Antennas for Wireless Sensor Networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 9, n. 3, p. 529 489, 2013. DOI: 10.1155/2013/529489

[7] M. M. Owais et al., "Autonomous Drone-Based Antenna Radiation Pattern Characterization," em *2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2022, pp. 207–213. DOI: 10.1109/ICUAS54217.2022.9836092

# Design and Validation of a Low-Cost 5G UAV-SDR Narrowband Channel Sounding System

Marlon da S. Borges, Rodrigo A. Bilobran, Roberto B. Di Renna, Pedro V. G. Castellanos, Victor Fernandes

***Abstract*— This paper presents the design and experimental validation of a low-cost UAV-based narrowband channel sounding system using a Software-Defined Radio (SDR). The platform integrates RF signal acquisition with Global Navigation Satellite System (GNSS) positioning and Inertial Measurement Unit (IMU) data, enabling synchronized Received Signal Strength Indicator (RSSI) measurements and antenna orientation estimation at 3.5 GHz. Experimental results validate the proposed multi-sensor architecture and demonstrate its suitability for orientation-dependent air-to-ground channel characterization. Moreover, the measured RSSI exhibits good agreement with the Free-Space Path Loss and Two-Ray propagation models, confirming the reliability and flexibility of the proposed platform for air-to-ground propagation measurements.**

***Keywords*— Channel sounding, UAV, SDR, RSSI, 5G.**

## I. Introduction

The widespread deployment of fifth-generation (5G) networks in the sub-6 GHz band poses significant challenges for network planning, particularly in Air-to-Ground (A2G) communications [1]. Wireless communications involving Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are strongly influenced by multipath effects, ground reflections, and variations in link geometry [2]. Consequently, the reliability of these communications depends on channel models that consider the particularities of altitude and link geometry dynamics [3].

Although classic propagation models, such as Free-Space Path Loss (FSPL) and the Two-Ray (2-Ray) model [4], are widely adopted as reference approaches for A2G links, previous studies indicate that these models may not accurately capture the effects observed in real-world environments, particularly in scenarios with mobility, multipath, and geometric variations [3]. Furthermore, the acquisition of accurate empirical data still often relies on specialized RF instrumentation and robust synchronization mechanisms between RF measurements and UAV telemetry.

In this context, Software-Defined Radio (SDR) emerged as a promising alternative for channel sounding and wireless communications due to its flexibility, reconfigurability, and cost-effectiveness [5]. The integration of SDRs into small aerial platforms allows access to In-phase and Quadrature (IQ) samples and the dynamic adjustment of communication parameters [6], both of which are essential for accurate channel characterization and modeling [7]. Nevertheless, ensuring measurement reliability requires the integration of Inertial Measurement Unit (IMU) and Global Navigation Satellite System (GNSS) data, enabling the precise correlation between RF measurements and the UAV's position and orientation.

This work proposes a narrowband channel sounding system operating at 3.5 GHz, based on a LimeSDR Mini embedded in a UAV. The main distinguishing feature of the proposed platform is the synchronized integration between RF measurements, GNSS positioning with Real-Time Kinematic (RTK), and the spatial orientation of the receiving antenna (*yaw*, *pitch*, and *roll*), enabling analyses that account for the angular geometry of the communication link [8]. The main contributions of this work are summarized as follows:

1) Development of a portable architecture integrating SDR, Raspberry Pi, and low-cost sensors embedded in a UAV;
2) Proposal of a multi-sensor synchronization methodology for channel characterization;
3) Integration of antenna angular characterization, GNSS RTK positioning, and orientation via an IMU, allowing a consistent and accurate use of directional antennas;
4) Experimental validation of the proposed system through a multi-sensor integration test and comparisons with the FSPL and 2-Ray propagation models.

The remainder of this paper is organized as follows. Section II describes the proposed system, including the receiver architecture, GNSS positioning with RTK, and antenna characterization. Section III presents the measurement campaign and relevant parameters for the experimental tests. Results are then discussed in Section IV. Finally, Section V presents the conclusions and perspectives for future work.

## II. System Description

This section presents the proposed narrowband channel sounding system and its main components. First, the receiver architecture embedded in the UAV is described, including the SDR, GNSS RTK module, IMU, and data synchronization strategy. Then, the operation of the RTK positioning system and the antenna characterization procedure are discussed, highlighting how these elements contribute to the analysis and interpretation of the measured propagation data.

M. da S. Borges and R. A. Bilobran are with the Department of Telecommunications Engineering, Fluminense Federal University (UFF), 24210-240, Rio de Janeiro, Brazil & Brazilian Navy, Rio de Janeiro, Brazil (e-mails: {marlon_borges, rbilobran}@id.uff.br.)

R. B. Di Renna, P. V. G. Castellanos, and V. Fernandes are with the Department of Telecommunications Engineering, Fluminense Federal University (UFF), 24210-240, Rio de Janeiro, Brazil (e-mails: {robertobrauer, pcastellanos, fernandesvictor}@id.uff.br.)

This work was supported by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) under grants 403784/2023-9, 402562/2024-0, 403327/2025-3, and Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) under grants E-26/210.493/2024, E-26/210.311/2024.

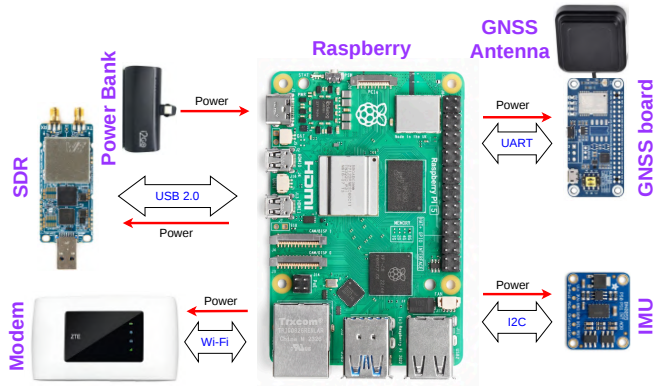
### A. *Receiver architecture*

The choice of components for the sounding was carefully evaluated to allow the system to be embedded in small UAVs. Thus, the selection and configuration of the hardware used were strongly conditioned by the need to minimize the final weight of the prototype while maintaining technical characteristics suitable for scientific research applications.

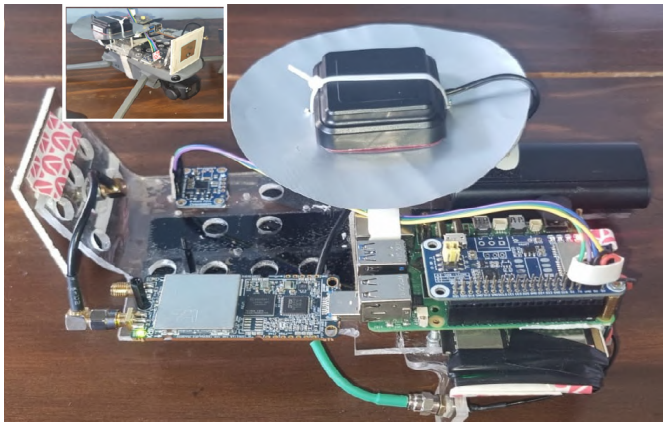
Accordingly, the proposed receiver system includes:

- LimeSDR Mini v2.4 SDR module for RF acquisition;
- Raspberry Pi 5 for peripheral orchestration, processing, and data storage;
- Waveshare LC29H Dual-band GNSS module with RTK support for precise georeferencing of samples;
- Adafruit BNO055 IMU module for recording the spatial orientation of the UAV;
- ZTE MF920U 4G Modem to provide internet access during flight;
- 4.66 dBi patch antenna at 3.5 GHz;
- *Power Bank* i2GO 5000 mAh to power the system.

Fig. 1(a) presents a schematic diagram of the receiver system, while Fig. 1(b) shows the physical implementation of the integrated platform, whose total weight was approximately 442 grams. A 4-mm acrylic sheet was used as a structural base, along with screws, velcro, and double-sided adhesive tape for securing the modules safely and with low weight. The power bank used proved sufficient to power the system for more than 120 minutes, meaning the duration of the experiments was limited mainly by the flight autonomy of the UAV.




(a)



(b)

Fig. 1. The receiver system, showing (a) a schematic diagram with a summary of the communication protocols between peripherals and the Raspberry Pi, and (b) a picture of the platform mounted on the acrylic base.

*1) LimeSDR:* The SDR is connected to the Raspberry Pi through a USB 2.0 interface, allowing continuous acquisition of complex IQ samples in baseband. Although the module supports USB 3.0 operation, the USB 2.0 interface was chosen due to the reduction of electromagnetic interference observed experimentally on the embedded GNSS module. During preliminary tests, it was found that USB 3.0 operation significantly degraded the quality of GNSS positioning, even with attempts to shield its coaxial cable, possibly due to electromagnetic interference generated by high-speed USB operation, as previously reported in similar contexts [9]. However, for the configurations used, the 2.0 port is sufficient.

RF acquisition is performed through a GNU Radio flowchart executed on the Raspberry Pi. The IQ samples received by the LimeSDR are converted to the frequency domain using FFT, and the power spectral density is subsequently calculated. The Received Signal Strength Indicator (RSSI) is estimated from the spectral peak in a narrow window centered on the Continuous-Wave (CW) carrier frequency. A preliminary calibration step of the LimeSDR was performed using a signal generator, a spectrum analyzer, a power divider, cables, and connectors. By simultaneously injecting the same signal into both receivers (the spectrum analyzer and the SDR) through the power divider, it was possible to define gain and offset parameters to compensate for the difference between the power measured by the spectrum analyzer and that measured by the LimeSDR. Due to the inherent flexibility of SDRs, other forms of acquisition are also under study for future work, including IQ sample capture for channel estimation, as discussed in [7].

*2) GNSS:* The LC29H GNSS module is connected to the Raspberry Pi via a Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART) serial interface, which records positioning data with a 1 Hz update rate. The receiver provides messages compliant with the National Marine Electronics Association (NMEA) 0183 standard, containing latitude, longitude, altitude, RTK solution quality, and the number of tracked satellites, in addition to saving raw GNSS observation data. RTK corrections are received via the *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol* (NTRIP) using a Wi-Fi connection with the embedded 4G modem. Additionally, a second LC29H module in the Base version is installed at the transmitter antenna position to continuously record GNSS observations at a fixed position. A brief presentation of the operation of GNSS RTK is shown in Section II-B.

*3) IMU:* The BNO055 module is connected to the Raspberry Pi via the $I^2C$ bus and operated in Nine Degrees of Freedom (NDOF) mode, performing embedded sensor fusion. The system continuously records the UAV orientation angles (*yaw*, *pitch*, and *roll*) and calibration levels. *Yaw* indicates the direction relative to magnetic North, while *pitch* and *roll* represent elevation and lateral inclinations, respectively. These angles are used to estimate the effective gain of the UAV antenna according to its orientation relative to the transmitter.

Due to the sensitivity of the BNO055 magnetometer to changes in the surrounding magnetic field, calibration was performed before each experiment [10]. For validation, the

UAV was manually oriented at 0°, 90°, 180°, and 270°. Fig. 2 shows an example of the validation process where the yaw follows the applied rotation, while pitch indicates a small inclination and roll remains close to 0º due to the geometry of the UAV and the mounting of the module on the acrylic base.

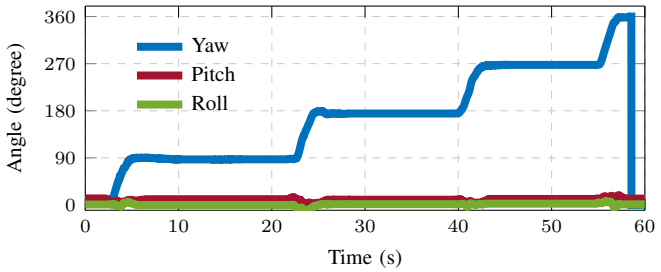



Fig. 2. Example of validation of the IMU calibration before the experiments.

*4) Data Synchronization:* Data from the different modules are recorded in three independent CSV files: RF spectral data, IMU orientation data, and GNSS/RTK data. Each subsystem records independent *timestamps* with millisecond resolution, allowing for temporal alignment during post-processing.

The different modules operate at different update rates. The IMU module performs acquisition at a frequency of approximately 80 Hz, RF spectral data are recorded at approximately 100 Hz, while the GNSS RTK module typically provides updates at 1 Hz. For data synchronization, it was decided to use the IMU records as the primary temporal reference (*master timeline*) due to the need to correctly associate the UAV's orientation with the spectral samples acquired by the SDR. GNSS data were temporally aligned through linear interpolation of geographic coordinates and altitude, while RF spectral data were associated with IMU samples using a nearest neighbor temporal strategy (*nearest neighbor*). The reduced update rate of the GNSS module can be partially compensated through temporal interpolation associated with proper planning of the measurement campaign. In particular, trajectories with approximately constant speeds or segmented acquisitions at predefined positions contribute to reducing spatial inconsistencies between synchronized samples.

### B. GNSS Positioning with RTK

Conventional GNSS positioning presents errors on the order of meters due to atmospheric effects and satellite inaccuracies [11], which can compromise the correlation between propagation data and link geometry. To mitigate this problem, the RTK technique was used, which allows for centimeter precision through differential carrier phase processing [12].

In this work, the GNSS receiver operates in *rover* mode, receiving corrections via NTRIP from the infrastructure of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) through a 4G connection. An IBGE's base station, located at Fluminense Federal University (UFF), was used due to its proximity to the experimental area.

In scenarios without connectivity, the system operates in a hybrid mode: a GNSS module at the transmitter position acts as a base, while the embedded rover records its observations. Subsequently, post-processed kinematics (PPK) is applied to reconstruct the trajectory with centimeter precision [12]. This approach ensures operational robustness in different environments. The LC29H base module can be used to enable RTK mode without IBGE service. However, this approach would require a dedicated link between the base and the rover, introducing unnecessary complexity.

An example of the RTK correction effect can be observed in Fig. 3. The green samples indicate a fixed RTK solution, associated with centimeter-level precision. Float RTK samples represent an intermediate solution, still of good quality, but without full ambiguity resolution. In standalone mode, shown in red, no differential corrections are applied, possibly due to loss of 4G connectivity, and the position is estimated only from the receiver's own observations. During the flight, the UAV altitude was intended to remain approximately constant. In particular, between 1000 and 2000 m of horizontal distance, the UAV was maintained at an altitude close to 24 m. Within this range, several standalone solutions occurred, and the estimated altitude presents significant drift relative to the expected value, introducing errors that may compromise data analysis depending on the precision required by the experiment. In this case, the PPK solution (black dots) was used to reconstruct the UAV trajectory with centimeter-level precision.

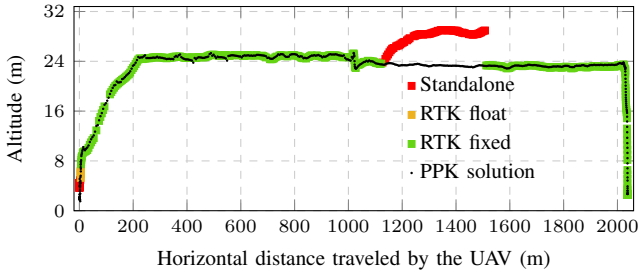



Fig. 3. Effect of correction data link loss on UAV height estimation.

### C. Antenna Characterization

Identical patch antennas were used at both the transmitter and receiver, operating in the 3.5 GHz band. These antennas were designed and manufactured at the UFF laboratory, and their gains were experimentally measured at approximately 4.66 dBi at 3.5 GHz. Additionally, the losses of the coaxial cables used in the transmitter and receiver were also characterized for subsequent power calculations in theoretical models.

To evaluate the angular behavior of the antennas, a characterization process of the radiation pattern in two dimensions (2D) was carried out. For this, an experimental structure equipped with two stepper motors was used, allowing for controlled positioning of the antenna under test in the azimuth and elevation axes. No anechoic chamber was available for the measurement, so an open area was selected to mitigate unwanted reflections.

During the procedure, the received power was recorded for different angular combinations, allowing the acquisition of the antenna's relative radiation pattern shown in Fig. 4. The angular characterization of the antennas, associated with orientation information provided by the IMU and the precise geometry of the link obtained through GNSS RTK, provides additional parameters for the analysis and interpretation of the spectral data measured during the experiments.

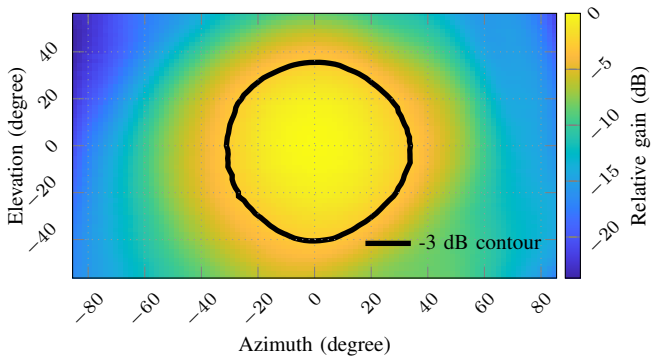



Fig. 4. Measured 2D radiation pattern of the patch antenna used in the transmitter and receiver.

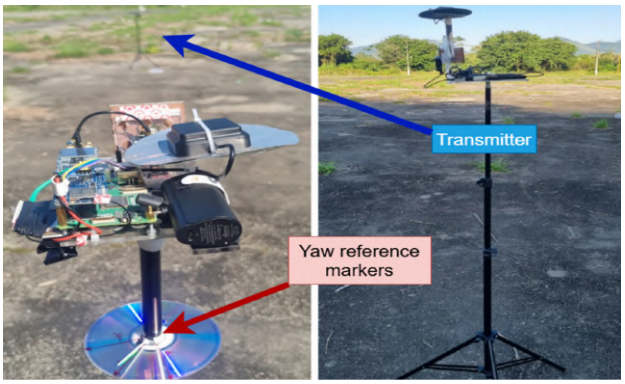



Fig. 5. Experimental setup during the measurement campaign, showing the transmitter and receiver platforms.

## III. Measurement Campaign

This section describes the measurement campaign carried out to validate the proposed channel sounding platform and the experimental configurations adopted during the tests. Two types of tests were performed to validate the receiver as a whole. The first test aimed to evaluate the integration of antenna characterization, IMU, and GNSS positioning. The second one consisted of comparing the behavior of the measured RSSI with consolidated theoretical models. In summary, in both measurement campaigns, the system operated with a 3.5 GHz CW signal and a transmitter output power of $-14.31$ dBm. Both the transmitter and receiver employed patch antennas with 4.66 dBi measured gain, while the total cable and connector loss was approximately 4.5 dB. The LimeSDR gain was set to 10 dB, and an additional empirically determined 8 dB offset was applied to compensate for internal losses and scaling effects introduced by FFT-based RSSI estimation. The measured noise floor within the analyzed spectral window was approximately $-90$ dBm.

### A. Multi-Sensor Data Integration Test

This test aimed to evaluate whether the integration among IMU, antenna characterization, and precise positioning via GNSS allows for refining the obtained spectral data. The experiment was conducted in a flat area, and the transmitter and receiver were positioned on pedestals at 1.3 m from the ground, with a separation of 10.3 m and boresights aligned. The position, height, and orientation of the transmitter antenna were recorded for post-processing. The receiver pedestal allowed rotation only in yaw, keeping the antenna level. Reference angles of 0º (boresight), +45º, and -45º were defined and marked on the pedestal for easier visualization and handling, as shown in Fig. 5.

During acquisition, the receiving platform was manually rotated between these angles, with brief pauses at each position. From the perspective of the transmitting antenna, the receiver always remained aligned with its boresight; therefore, it is expected that the calculation of the estimated relative gain in post-processing results in a gain close to 0 dB over time. The transmitter antenna gain was estimated from the angle between the known and fixed transmitter boresight vector and the receiver direction, whose position was obtained from the receiver GNSS module based on its geographic coordinates and altitude. The resulting angle was then associated with the previously characterized radiation pattern.

To calculate the relative gain of the receiving antenna, the angle between the boresight vector and the transmitter's direction is considered, as well as the orientation provided by the IMU. In this controlled test, only the yaw significantly influences the estimated gain. The implemented post-processing code already considers pitch variations associated with the height difference between the transmitter and receiver and the UAV tilt, which, in this experiment, is negligible due to the geometry adopted to facilitate data interpretation. The effect of roll, related to polarization misalignment between antennas, was not implemented. From the antenna characterization, the -3dB point of polarization mismatch is reached at approximately $\pm 45^\circ$ of roll, while empirical measurements indicated a UAV roll variation within $\pm 28^\circ$. Therefore, its influence was considered negligible for the present experiments.

### B. Large-Scale Fading and Propagation Model Validation

In this experiment, conducted in the same open area described in Section III-A, the objective was to evaluate whether the observed channel fading follows the behavior predicted by propagation models widely described in the literature, such as the FSPL and 2-Ray models [4]. The flight plan consisted of an approximately 70 m straight-line radial trajectory toward the transmitter, while maintaining the UAV at approximately the same height as the transmitter antenna (about 1.5 m above ground level) and keeping the antennas aligned to minimize the influence of antenna directivity on the results. Post-processing filtering was performed to select RF samples corresponding to distances between 10 and 70 m from the transmitter using synchronized GNSS and IMU data, and the resulting measurements were then compared with the FSPL and 2-Ray theoretical models.

## IV. Experimental Results

This section presents the experimental results obtained with the proposed platform, first evaluating the effects of antenna orientation on the received signal and then comparing the measured RSSI with theoretical propagation models.

### A. Data Integration Validation

Fig. 6 presents the measured RSSI (left axis) and the estimated relative gains of the transmitting and receiving antennas

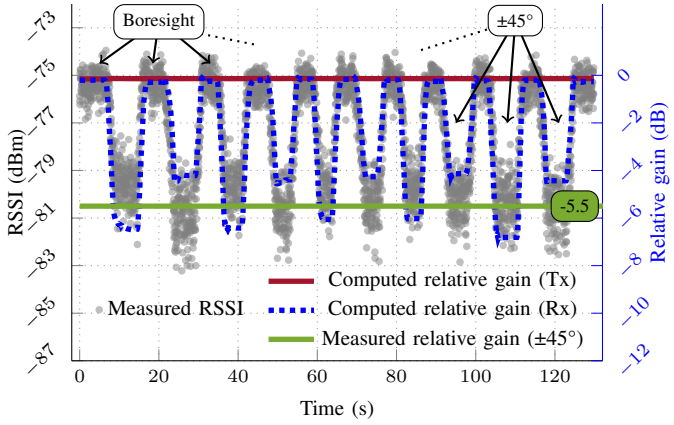



Fig. 6. Antenna gain variation due to misalignment on RSSI over time.

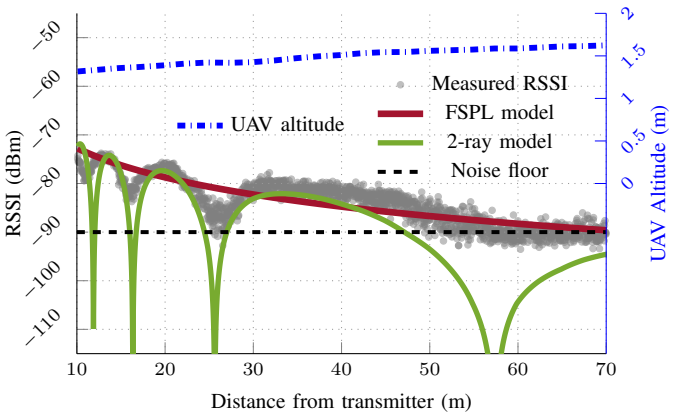



Fig. 7. Measured RSSI and propagation model comparison

(right axis) during the controlled yaw variation experiment. Based on the measured radiation pattern, a misalignment of $\pm 45°$ at elevation $0°$ results in a reduction in antenna gain of approximately $-5.5$ dB, and this effect is consistently observed in the measured RSSI when the misalignment reaches $\pm 45°$. The computed transmitter antenna gain remained close to 0 dB, as expected, while the estimated receiving antenna gain adequately reproduces both the temporal behavior of the signal and the depth of the fading. Small discrepancies between the alternating relative gain minima were attributed to initial experimental misalignment or deviations in the module's yaw measurement. A more careful evaluation of the results suggests that applying a correction of approximately $-5°$ to the yaw column of the dataset makes the estimated gain minima more uniform and consistent with the antenna radiation pattern, approaching the expected value of approximately $-5.5$ dB for both $\pm 45°$ misalignment conditions. These results indicate that the integration between IMU, GNSS, and antenna characterization is suitable for analyses dependent on UAV orientation.

### *B. Large-Scale Fading and Propagation Model*

Fig. 7 presents the measured RSSI (left axis) along the planned flight path, as well as the expected RSSI based on the FSPL and 2-Ray models. The corresponding UAV altitude is also shown on the right axis. It is observed that the UAV height shows small variations around the planned altitude, since maintaining a precise and constant UAV altitude during flight is difficult. The first three fades of the measured RSSI show good agreement with the 2-Ray model, while the fourth fade was not observed due to the SDR noise floor. The small discrepancies in the fade positions are likely due to UAV altitude variations during flight. Nevertheless, the results indicate that the receiver setup operated properly onboard the UAV, demonstrating its reliability for measurements in other environments.

## V. Conclusion

This work presented a narrowband channel sounding system based on an SDR embedded in a UAV, integrating RF measurements, GNSS positioning with RTK, and IMU-based orientation data. The proposed architecture demonstrated the feasibility of a low-cost and flexible platform for empirical channel characterization. Experimental results showed that the integration of antenna radiation characterization with precise positioning and UAV orientation is an effective approach for analyzing the impact of angular misalignment on the received signal. This capability enables a more detailed interpretation of propagation effects, especially when directional antennas are employed. Furthermore, the large-scale analysis indicated good agreement between the measured RSSI and theoretical propagation models, particularly the two-ray model, supporting its applicability to broader channel sounding campaigns in other environments.

## References

[1] D. W. Matolak and R. Sun, "Air–Ground Channel Characterization for Unmanned Aircraft Systems—Part I: Methods, Measurements, and Models for Over-Water Settings," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 1, pp. 26–44, 2017.

[2] T. O. Costalonga, W. S. L. Soares, V. P. R. Magri, and V. Fernandes, "Statistical analysis and modeling of a quadrotor's radar cross-section," in *2023 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*, 2023, pp. 1–7.

[3] A. A. Khuwaja *et al.*, "A Survey of Channel Modeling for UAV Communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 2804–2821, 2018.

[4] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Prentice Hall, 2002.

[5] E. T. Michailidis, K. Maliatsos, and D. Vouyioukas, "Software-Defined Radio Deployments in UAV-Driven Applications: A Comprehensive Review," *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 5, pp. 1545–1586, 2024.

[6] P. V. A. Freitas *et al.*, "Implementation of a spectrum analyzer using the software-defined radio concept," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 20, no. 4, pp. 801–811, 2021.

[7] S. J. Maeng *et al.*, "LTE I/Q Data Set for UAV Propagation Modeling, Communication, and Navigation Research," *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 9, pp. 90–96, 2023.

[8] Y. Lyu, W. Wang, and P. Chen, "Fixed-Wing UAV-Based Air-to-Ground Channel Measurement and Modeling at 2.7 GHz in a Rural Environment," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 73, no. 4, pp. 2038–2052, 2025.

[9] Intel Corporation, "USB 3.0 Radio Frequency Interference Impact on 2.4 GHz Wireless Devices," https://www.usb.org/sites/default/files/327216.pdf, 2012, white Paper.

[10] Adafruit, "Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor," https://learn.adafruit.com/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor, accessed: Apr. 2026.

[11] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More*. Springer, 2008.

[12] T. Takasu, "RTKLIB Ver. 2.4.2 Manual," https://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf, 2013.