

Geolocalização de Interferência GNSS sobre o Brasil a partir de Satélites em Órbita Baixa: Análise de Viabilidade com Dados Públicos

Ricardo Massolini^{1,2}

¹Grafter Intelligence, São José dos Campos/SP – Brasil

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo — A interferência intencional em GNSS, por *jamming* e por *spoofing*, ameaça a referência de tempo que sincroniza infraestruturas críticas, entre elas a medição sincrofásorial do sistema elétrico. Este trabalho avalia, apenas com dados públicos, a viabilidade de detectar e geolocalizar essa interferência sobre o Brasil a partir de constelações de reflectometria em órbita baixa. A cobertura é simulada a partir dos parâmetros orbitais públicos da CYGNSS. Os limites de geolocalização são derivados da geometria Doppler por meio de um limite de Cramér-Rao. Todo o território é coberto, com revisita de detecção em torno de vinte minutos e passagem favorável à geolocalização a cada 1,2 horas. A acurácia não é limitada pela geometria, que é favorável, mas pela duração da captura, da ordem de dezenas de segundos. O primeiro fixo de escala quilométrica ocorre em uma a duas horas. Conclui-se pela viabilidade e propõe-se uma agenda para a defesa.

Palavras-Chave — Guerra Eletrônica, Sistemas de Navegação GNSS, Sensoriamento Remoto.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas globais de navegação por satélite (GNSS) fornecem não apenas posição, mas também a referência de tempo que sincroniza setores críticos. Os sinais chegam à superfície com potência muito baixa. Isso os torna vulneráveis ao bloqueio por *jamming* e à falsificação por *spoofing*. A incidência dessas interferências cresceu em regiões de tensão geopolítica, com efeitos sobre a aviação e as operações militares [1], [2]. A observação da interferência a partir de órbita baixa da Terra já se consolidou como técnica viável. Um receptor a bordo da Estação Espacial Internacional localizou uma fonte com erro inferior a um quilômetro [3]. Dados abertos da constelação CYGNSS (Cyclone Global Navigation Satellite System) mapearam interferência em escala global [4].

Falta, porém, uma avaliação objetiva de uma pergunta operacional para o Brasil. As constelações de reflectometria já em órbita, com dados públicos, conseguem observar e geolocalizar interferência sobre o território nacional? E com que frequência e acurácia? Este trabalho responde a essa pergunta sem coletar dados novos e sem executar campanha experimental. A contribuição é quádrupla. A primeira é um modelo de ameaça que liga a interferência de GNSS à infraestrutura crítica brasileira de forma quantificada. A segunda é uma análise de cobertura sobre o Brasil, derivada dos parâmetros orbitais públicos da CYGNSS. A terceira é um limite de acurácia de geolocalização derivado da geometria Doppler, que converte a viabilidade em requisitos de engenharia mensuráveis. A quarta é a síntese desses resultados em parâmetros operacionais, incluindo o tempo esperado entre a ativação de um emissor e sua

localização, base de uma agenda objetiva para a defesa.

Em termos operacionais, a conclusão é direta. Um emissor que ative interferência sobre o território nacional pode ser detectado em dezenas de minutos e ter a posição fixada na escala do quilômetro em uma a duas horas, com meios já em órbita e a custo de observação nulo. O obstáculo para converter essa possibilidade em capacidade efetiva não é um satélite a construir, mas uma cadeia de processamento a desenvolver. As seções seguintes sustentam essa afirmação.

II. GNSS, TEMPO E INFRAESTRUTURA CRÍTICA

A dependência do GNSS extrapola a navegação. No sistema elétrico, a medição fasorial sincronizada é a base do monitoramento de área ampla do Sistema Interligado Nacional. Ela exige uma referência de tempo absoluta, fornecida por relógios disciplinados por GNSS. O requisito é estrito. Para manter o erro vetorial total abaixo de 1%, o escorregamento do relógio não pode exceder cerca de vinte e seis microssegundos [5]. *Jamming* e *spoofing* degradam exatamente essa referência. Um ataque de radiofrequência converte-se, assim, em risco à operação da rede. A interferência deixa de ser um problema de navegação e passa a ser uma ameaça de infraestrutura crítica.

O Brasil agrega dois fatores. O território já é um dos mais afetados do mundo pela degradação natural da banda L. Essa degradação decorre da cintilação ionosférica associada à anomalia equatorial e à anomalia magnética do Atlântico Sul, fenômeno extensamente monitorado no país [6]. A mesma capacidade de observação espacial que apoia o estudo do clima espacial pode servir à detecção da interferência intencional. Somam-se a extensão territorial, a vigilância de fronteiras e a cobertura da Amazônia, onde a observação orbital tem vantagem singular de alcance.

Dois aspectos ampliam o valor da observação espacial e raramente são explicitados. O primeiro é o arquivo. O produto de nível 1 da CYGNSS registra o piso de ruído calibrado desde agosto de 2018. Uma climatologia de interferência sobre o território brasileiro, de vários anos, já está latente em dado aberto, sem qualquer novo *tasking*. O segundo é a assimetria entre as ameaças. O piso de ruído é sensível sobretudo ao *jamming*, que eleva a potência recebida. O *spoofing* imita o sinal GNSS em baixa potência e exige observáveis adicionais para a detecção, mas permanece geolocalizável pela mesma geometria Doppler enquanto o emissor transmite.

III. OBSERVAÇÃO DE INTERFERÊNCIA A PARTIR DE ÓRBITA BAIXA

A literatura foi levantada por busca estruturada em bases abertas e sintetizada por revisões recentes da geolocalização de radiofrequência por satélite [7]. Ela se organiza em três classes

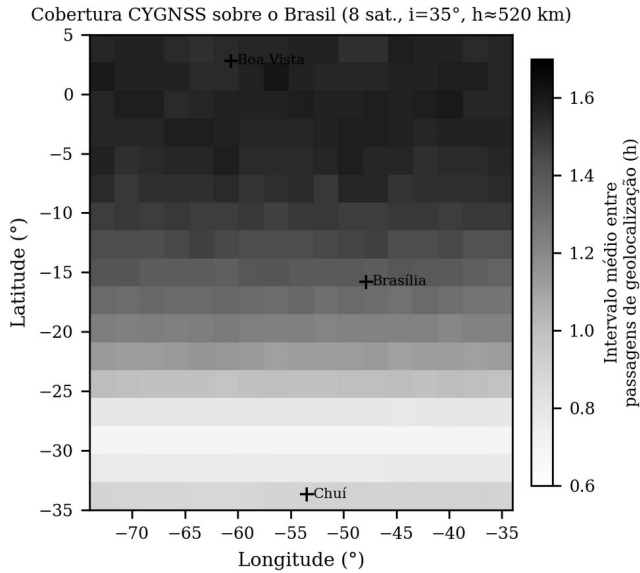


Fig. 1. Intervalo médio entre passagens favoráveis à geolocalização sobre o Brasil, a partir da órbita pública da CYGNSS. Tons mais claros indicam revisita mais frequente. Fonte: elaboração dos autores.

de sensor. A primeira é a reflectometria de GNSS. A CYGNSS mapeia interferência [4], seus dados brutos revelam interferência na banda L1 [8] e o TRITON, satélite de reflectometria de GNSS, registra eventos [9]. A segunda são os receptores definidos por *software* em plataformas tripuladas, como o da Estação Espacial [3]. A terceira são as cargas dedicadas em nanossatélite, voltadas a detectar, classificar e localizar *jamming* e *spoofing* [10]. A detecção é a tarefa mais madura e baseia-se em anomalias de ruído [8], [11]. A classificação avançou com redes convolucionais [12], embora *baselines* simples ainda compitam com modelos profundos [13].

A geolocalização é a tarefa menos consolidada e a mais relevante para a defesa. Métodos por deslocamento e taxa Doppler a partir de um único satélite foram validados contra dados brutos da CYGNSS [14]. A geolocalização de *spoofing* a partir de órbita baixa foi demonstrada [15], com fundamento teórico na estimação de posição por desvios Doppler [16]. O precedente de erro abaixo de um quilômetro da Estação Espacial [3] estabelece a referência de acurácia. Não se identificou, porém, um *benchmark* aberto dedicado à geolocalização espacial, nem avaliação de viabilidade voltada ao território brasileiro. As seções seguintes preenchem essa lacuna.

IV. ANÁLISE DE COBERTURA SOBRE O BRASIL

A CYGNSS é uma constelação de oito microssatélites em órbita circular a cerca de 520 km, com inclinação de 35°. Por isso cobre a faixa entre 38°N e 38°S [17]. O território brasileiro, de cerca de 5°N a 34°S, está integralmente contido nessa faixa. Para quantificar a cobertura, propagaram-se os oito satélites a partir desses parâmetros públicos, ao longo de sete dias, com um modelo circular de plano único e rotação da Terra. Sobre uma grade do território, computaram-se três grandezas. A primeira é a cobertura, o percentual do tempo com ao menos um satélite acima da máscara de 5° de elevação. A segunda é a revisita de detecção, o maior intervalo sem nenhum satélite acima de 5°. A terceira é o intervalo entre passagens favoráveis à geolocalização, definidas por elevação superior a 30°.

TABELA I
COBERTURA DA CYGNSS EM LOCAIS REPRESENTATIVOS.

Local	Cob. (%)	Det. (min)	Geo. (h)
Boa Vista (RR)	23	26	1,6
Manaus (AM)	23	26	1,5
Brasília (DF)	28	19	1,4
São Paulo (SP)	34	17	1,1
Porto Alegre (RS)	31	20	0,7
Chuí (RS)	29	22	0,8

Os resultados, resumidos na Tabela I e mapeados na Fig. 1, indicam viabilidade ampla. A revisita média de detecção fica em torno de vinte minutos. Uma passagem favorável à geolocalização ocorre, em média, a cada 1,2 horas. A cobertura é melhor sobre o sul do país, próximo à latitude de retorno da órbita, com passagens a cada 0,7 hora. É mais espaçada sobre o norte equatorial, cerca de 1,5 horas, mas permanece abaixo de duas horas em todo o território. Esses números resultam de uma única constelação científica de acesso aberto, sem qualquer ativo dedicado.

Dois aspectos merecem destaque. O primeiro é a não uniformidade da cobertura. A revisita de geolocalização é cerca de duas vezes mais frequente no sul do que no norte equatorial. Isso ocorre porque o sul está próximo à latitude de retorno da órbita, de 35°, onde os satélites permanecem mais tempo por ciclo. A consequência é estratégica. A Amazônia e a fronteira norte, de maior interesse para a vigilância nacional, são as regiões menos favorecidas pela geometria da CYGNSS, cuja órbita não foi concebida para esse fim. Isso reforça o argumento técnico para um ativo nacional em inclinação mais alta. O segundo aspecto é a largura útil. A taxa Doppler na maior aproximação permanece acima de 65% do pico até 600 km de afastamento do traço no solo (*ground track*). Por isso cada passagem cobre uma faixa de cerca de 1.200 km para fins de geolocalização, dezenas de vezes maior que a faixa de 25 km do produto científico de reflectometria. A interferência aproveitada, assim, muito mais da constelação do que a sua aplicação de origem. As duas análises são consistentes, pois essa faixa coincide com as passagens de elevação superior a 30°.

O modelo é deliberadamente simplificado, com órbita circular e plano único. Ele tende a ser conservador, pois a deriva real dos planos da constelação diversifica a amostragem. Os valores devem ser lidos como ordem de grandeza de viabilidade, não como previsão operacional fina.

V. LIMITES DE ACURÁCIA DE GEOLOCALIZAÇÃO

A geolocalização por satélite único explora o desvio Doppler do sinal do emissor. Para a banda L1, em 1.575,42 MHz, e velocidade orbital de 7,6 km/s, o desvio máximo é de cerca de 40 kHz. A sensibilidade no nadir alcança 0,077 Hz por metro. A Fig. 2 mostra a assinatura Doppler de um emissor terrestre para diferentes afastamentos em relação ao traço no solo do satélite. Para o emissor próximo ao traço no solo, a curva em S é mais íngreme na maior aproximação, o que concentra a informação de posição. A curva se suaviza com o afastamento.

O modelo de sobrevoo retilíneo que gera as Figs. 2 e 3 é descrito a seguir, para permitir a reprodução. Para um emissor fixo na superfície, o desvio Doppler observado no satélite é

$$f_D(t) = -\frac{f_0}{c} \dot{R}(t), \quad R(t) = \sqrt{R_{\min}^2 + v^2 t^2}, \quad (1)$$

em que f_0 é a frequência do emissor, c a velocidade da luz, v a

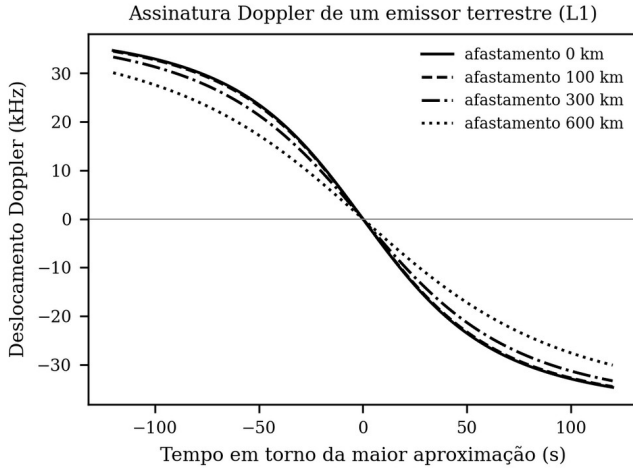


Fig. 2. Assinatura Doppler de um emissor terrestre na banda L1, para afastamentos crescentes em relação ao traço no solo do satélite. Fonte: elaboração dos autores.

velocidade orbital, R a distância satélite-emissor e $R_{\min}$ o seu valor mínimo. No nadir, $R_{\min}$ iguala a altitude h , e a sensibilidade espacial do Doppler vale

$$s = \frac{f_0 v}{c h} \approx 0,077 \text{ Hz/m}, \quad (2)$$

para $f_0 = 1.575,42 \text{ MHz}$, $v = 7,6 \text{ km/s}$ e $h = 520 \text{ km}$. A taxa Doppler na maior aproximação, $f_0 v^2 / (c R_{\min})$, resulta em cerca de 580 Hz/s no nadir.

A taxa Doppler na maior aproximação governa a observabilidade da posição e permanece elevada em uma faixa larga. Vale cerca de 580 Hz/s sobre o traço no solo e ainda 380 Hz/s a 600 km de afastamento. A geometria favorável à geolocalização não se restringe a passagens quase verticais, cobrindo uma faixa de centenas de quilômetros a cada passagem.

Para a acurácia, monta-se a matriz de informação de Fisher a partir da série de medições Doppler de uma passagem, com a posição e a velocidade do satélite conhecidas e o emissor restrito à superfície. A frequência do emissor é tratada como parâmetro de estímulo desconhecido [16]. Sob ruído gaussiano de desvio-padrão σ_f , a covariância da posição do emissor, após marginalizar essa frequência, é

$$C_p = \sigma_f^2 \left[\sum_k h_k h_k^\top - \frac{(\sum_k h_k a_k)(\sum_k h_k a_k)^\top}{\sum_k a_k^2} \right]^{-1}, \quad (3)$$

em que h_k é o gradiente do Doppler em relação à posição do emissor na superfície e a_k a sua derivada em relação à frequência. O erro horizontal da Fig. 3 é a raiz do traço de C_p , avaliado para σ_f de 5, 10 e 20 Hz e afastamento de 300 km em relação ao traço no solo. A subtração do segundo termo em (3) representa a perda de informação causada pela frequência desconhecida, o que explica por que capturas muito curtas, que amostram pouco da curva em S, não bastam.

O resultado é esclarecedor. Capturas muito curtas, de poucos segundos, não bastam quando o desvio de frequência é desconhecido. Já cerca de trinta segundos de observação contínua a uma precisão de 10 Hz colocam o erro na faixa quilométrica reportada [3], [14], e alguns minutos levam a erros abaixo de cem metros. O fator limitante não é a geometria de observação, favorável sobre todo o Brasil, e sim a duração da captura,

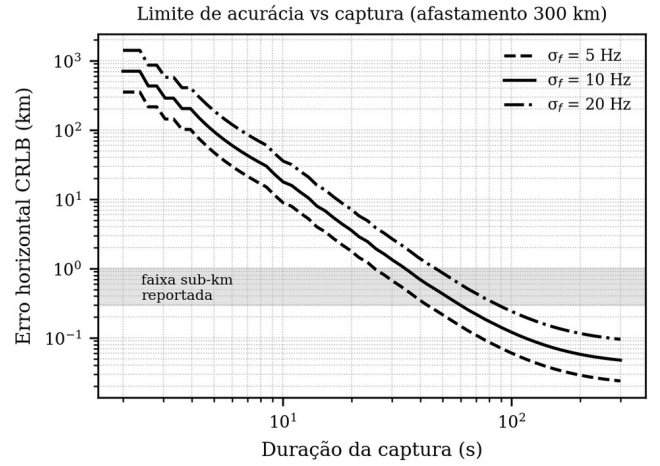


Fig. 3. Limite de Cramér-Rao do erro horizontal de geolocalização em passagem única, em função da duração da captura e da precisão de medição Doppler. A faixa sombreada indica a acurácia abaixo de um quilômetro reportada na literatura. Fonte: elaboração dos autores.

TABELA II
PARÂMETROS OPERACIONAIS DERIVADOS DAS ANÁLISES.

Parâmetro operacional	Valor derivado
Revisita de detecção (média)	~20 min
Intervalo entre passagens de geolocalização	0,7–1,5 h
Faixa de geolocalização por passagem	~1.200 km
Captura para erro quilométrico (σ_f 10 Hz)	~30 s
Erro horizontal com poucos minutos (CRLB)	< 100 m
Tempo até o primeiro fixo (emissor persistente)	1–2 h
Custo do segmento de observação	nulo (dado aberto)

a precisão de medição e a estimação do desvio de frequência. Isso transforma a pergunta de viabilidade em requisitos de engenharia concretos para um processador nacional: capturas da ordem de dezenas de segundos e precisão Doppler de poucos hertz. Tais requisitos são plenamente alcançáveis para um emissor de interferência, que é persistente e de potência elevada.

A combinação da cobertura com a acurácia produz a métrica que de fato interessa à operação. Para um emissor persistente, o tempo esperado entre a ativação e um primeiro fixo de escala quilométrica é da ordem do intervalo entre passagens favoráveis, de uma a duas horas. A captura de dezenas de segundos é desprezível frente a esse intervalo. A geolocalização por passagem única carrega uma ambiguidade especular em torno do traço no solo, inerente ao método Doppler de satélite único. Essa ambiguidade resolve-se por uma segunda passagem de geometria distinta, oferecida pela constelação de oito satélites dentro da mesma janela. O caráter multissatélite, portanto, não apenas adensa a revisita, mas torna o fixo inequívoco. A Tabela II consolida os parâmetros operacionais derivados.

VI. DISCUSSÃO, AGENDA E CONCLUSÃO

Os resultados das Seções IV e V, consolidados na Tabela II, sustentam uma conclusão operacional concreta: ativos públicos já em órbita observam e geolocalizam interferência sobre todo o território brasileiro com meios abertos. O resultado de maior alcance, porém, não é a cobertura em si. A análise de Cramér-Rao mostra que a geometria de observação não é o fator limitante, pois é favorável sobre todo o país. A acurácia é governada pela duração da captura, pela precisão de medição

Doppler e pela estimação do desvio de frequência do emissor. A pergunta de viabilidade converte-se, assim, em requisitos de engenharia mensuráveis: capturas da ordem de dezenas de segundos e precisão de poucos hertz bastam para a faixa quilométrica. Esses requisitos são plenamente alcançáveis para um emissor de interferência, persistente e de potência elevada.

Decorre disso o diagnóstico central. A barreira para uma capacidade nacional não é a inexistência de meios de observação, que já existem e são abertos, mas a ausência de uma cadeia de processamento e de um conjunto de validação. Como o segmento de observação tem custo nulo, todo o investimento concentra-se em *software*. Isso reduz drasticamente a barreira de entrada frente à alternativa de construir um satélite dedicado de inteligência de sinais.

A agenda para a defesa é objetiva e escalonada. No curto prazo, cabe reconstruir a climatologia de interferência sobre o território a partir do arquivo aberto da CYGNSS desde 2018, um ganho imediato sem qualquer *tasking*, e construir um *benchmark* aberto de geolocalização espacial sobre a região. No médio prazo, cabe desenvolver e validar um processador de geolocalização Doppler contra fontes conhecidas. No longo prazo, cabe avaliar uma carga útil nacional de inteligência de espectro. Aqui o resultado de cobertura é diretivo. A revisita fraca sobre o norte indica que tal ativo deveria adotar inclinação mais alta que a da CYGNSS, de modo a favorecer a Amazônia e a fronteira setentrional. A competência instalada em reflectometria e sensoriamento sustenta esse caminho.

O trabalho tem limitações que definem o esforço futuro imediato. O modelo orbital é simplificado, com órbita circular e plano único. O limite de Cramér-Rao assume desvio de frequência constante e efemérides perfeitas, sendo otimista frente às instabilidades reais do emissor. O recorte é a banda L1. A análise de cobertura não modela o padrão de antena nem a potência do emissor, fatores que afetam o alcance de detecção real. O refinamento desses pontos, ao lado de um estudo empírico com os dados públicos da CYGNSS, constitui a con-

tinuidade natural deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Center for Strategic and International Studies, “Extending the Battlespace to Space”, 2025.
- [2] “Recent GPS Jamming in Regions of Geopolitical Conflict”, *GPS World*, 2025.
- [3] M. J. Murrian *et al.*, “First results from three years of GNSS interference monitoring from low Earth orbit”, *NAVIGATION*, vol. 68, n. 4, pp. 673–685, 2021.
- [4] C. Chew, T. M. Roberts, S. Lowe, “RFI Mapped by Spaceborne GNSS-R Data”, *NAVIGATION*, vol. 70, n. 4, 2023.
- [5] Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Submódulo 11.8: Sistema de Medição Fasorial Sincronizada”, Procedimentos de Rede do ONS, requisitos de sincronismo GNSS.
- [6] A. Aguiar *et al.*, “Impact of Ionospheric Scintillations on GNSS Availability and Precise Positioning over Brazil”, *Space Weather*, 2025.
- [7] N. Hendy, B. Manzoor, A. Hourani, “Beyond GNSS: A Survey and Tutorial on Satellite-Based RF Geolocation and Emitter Fingerprinting”, RMIT University, 2026.
- [8] “Detection and Analysis of GPS L1-Band RFI Using Spaceborne GNSS Reflectometry Receivers”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 63, 2025.
- [9] “Analysis of GNSS Interference Events Based on TRITON GNSS-R Measurements”, *NAVIGATION*, vol. 72, n. 4, 2025.
- [10] “GNSS Radio Frequency Interference Monitoring from LEO Satellites: An In-Laboratory Prototype”, *Sensors*, vol. 24, n. 2, p. 508, 2024.
- [11] “Detection of GNSS Interference Using Reflected Signal Observations from the LEO Satellite Constellation”, arXiv, 2026.
- [12] I. E. Mehr, F. Dovis, “A Deep Neural Network Approach for Classification of GNSS Interference and Jammer”, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2024.
- [13] V. Ivanov, R. C. Wilson, M. Scaramuzza, “Towards Simple Machine Learning Baselines for GNSS RFI Detection”, arXiv:2504.07993, 2025.
- [14] P. Ellis, D. Van Rheeden, F. Dowla, “Use of Doppler and Doppler Rate for RF Geolocation Using a Single LEO Satellite”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12907–12920, 2020.
- [15] Z. Clements, P. Ellis, M. L. Psiaki, T. E. Humphreys, “Geolocation of terrestrial GNSS spoofing signals from low Earth orbit”, in *Proc. ION GNSS+ 2022*, pp. 3418–3431.
- [16] A. Amar, A. J. Weiss, “Localization of narrowband radio emitters based on Doppler frequency shifts”, *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, n. 11, pp. 5500–5508, 2008.
- [17] C. S. Ruf *et al.*, “New ocean winds satellite mission to probe hurricanes and tropical convection (CYGNSS)”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 97, n. 3, pp. 385–395, 2016.