

# Convivência 5G e Radares Altimétricos: uma abordagem de processamento de sinais

Leandro da Silva Pires

**Resumo**— A convivência entre estações base 5G em 3,5 GHz e radares altimétricos em 4,2-4,4 GHz foi bastante estudada ao longo dos dois últimos anos. No entanto, estes estudos focaram mais na saturação dos radares causadas por emissões fundamentais das estações base e menos na dessensibilização causada por emissões espúrias. Este trabalho modela o funcionamento de um radar conforme Recomendação ITU-R M.2059 e ilustra o efeito da dessensibilização na detecção de altitude de uma aeronave.

**Palavras-Chave**— Altimetro, 5G, Processamento de sinais.

**Abstract**— Coexistence between 5G base stations at 3.5 GHz and radar altimeters at 4.2-4.4 GHz has been extensively studied over the last two years. However, these studies have focused more on radar saturation caused by fundamental emissions from base stations and less on desensitization caused by spurious emissions. This work models the operation of an ITU-R Recommendation M.2059 radar and illustrates the effect of desensitization on the altitude detection of an aircraft.

**Keywords**— Altimeter, 5G, Signal Processing.

## I. INTRODUÇÃO

A harmonização da faixa de 3,5 GHz em toda sua extensão (3,3 GHz a 3,8 GHz) na Região 2 (Américas e Caribe) foi discutida ao longo das Conferências Mundiais de Radiocomunicações de 2019 e de 2023 [1]. No entanto, após a licitação da faixa de 3,7 GHz a 3,98 GHz nos Estados Unidos em 2020, um relatório da Comissão Técnica de Rádio para Aeronáutica (*Radio Technical Commission for Aeronautics* – RTCA) fez-se notar por concluir que estações rádio base 5G operando entre 3,7 GHz e 3,98 GHz poderiam causar interferência prejudicial em radares altimétricos de aeronaves operando na faixa de 4,2 GHz a 4,4 GHz [2]. Estudos subsequentes de compatibilidade entre estações IMT e radares altimétricos sugeriram possível interferência quando da operação de estações base em faixas superiores a 3,7 GHz [3]–[5].

No Brasil, o uso da faixa de 3,7 GHz a 3,8 GHz é autorizado para operação de redes privadas, preferencialmente em ambientes internos de edificações (*indoor*), o que resultou numa separação espectral de 500 MHz entre as faixas de operação das estações base e dos radioaltímetros [6]. Ao conduzir um estudo de convivência, a Anatel observou uma margem de 15 dB a 20 dB entre a operação de uma rede 5G e o critério de proteção dos radares altimétricos contra interferências prejudiciais [7]. Não obstante uma separação espectral superior a de outros países, a Agência adotou medidas adicionais de mitigação de interferências tais como limites mais restritivos

Leandro da Silva Pires é Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais, com Doutorado Sanduíche na Universidade de Surrey, no Reino Unido. É Especialista em Regulação da Agência Nacional de Telecomunicações, Brasília-DF, e-mail: leandrop@anatel.gov.br. Este trabalho não reflete necessariamente a posição oficial da Agência, somente firmada por seu Conselho Diretor.

nas proximidades dos aeroportos e ângulos de apontamento do feixe principal não superiores à linha do horizonte [8].

Estudos de convivência baseados na Rec. ITU-R M.2101 apresentam seus resultados na forma de funções de distribuição cumulativa (*cumulative distribution function* – cdf) do nível de interferência agregada incidente na estação vítima, que poderão (ou não) exceder critérios estabelecidos de proteção contra interferências, comumente expressos pela razão interferência-ruído ( $\frac{I}{N}$ ), sem observarem os efeitos no desempenho dessa mesma estação [9]. Este artigo se propõe a ilustrar esses efeitos na detecção de altitude por um modelo de radar altimétrico baseado na Recomendação ITU-R M.2059 [10], quando a margem observada no estudo brasileiro diminui.

## II. APROXIMAÇÕES DE INTERFERÊNCIA

A Figura 1 ilustra o cenário de interferência no qual o receptor do radar altimétrico de uma aeronave próxima ao solo recebe sinais interferentes provenientes de estações base 5G no interior da área de cobertura do radar. Uma aproximação do sinal interferente incidente no receptor, bem como o efeito da dessensibilização causada pela interferência agregada, são desenvolvidos nas subseções que se seguem.

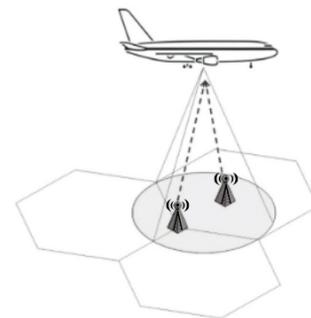


Fig. 1: Cenário de interferência no qual o radar altimétrico recebe sinais interferentes das estações base 5G.

### A. Razão Interferência-Ruído

Um modelo tradicional de análise de interferências se dá a partir do cálculo do sinal interferente de uma única estação:

$$I_i = P_{BS,i} + G_{BS,i}(\theta_i, \phi_i) + G_{RA} - PL_i - L_{acc} - FDR, \quad (1)$$

onde  $P_{BS,i}$  e  $G_{BS,i}$  são potência transmitida e ganho da  $i$ -ésima estação base, respectivamente.  $G_{RA}$  é o ganho da antena do radar altimétrico.  $PL_i$  é a perda de percurso com origem na  $i$ -ésima estação base,  $L_{acc}$  são as perdas acessórias (cabos, polarização) e FDR é a rejeição dependente da frequência.

A interferência agregada de todas as estações base no interior da área de cobertura do radar é dada por:

$$I = 10 \log_{10} \left( \sum_{i=1}^{N_{BS}} 10^{\frac{I_i}{10}} \right), \quad (2)$$

onde  $N_{BS}$  é número aproximado de estações base no interior da área de cobertura do radar altimétrico. Adicionalmente, o ruído do radar é dado por:

$$N = -114 + 10 \log_{10}(BW_{RA}) + N_F, \quad (3)$$

onde  $N_F$  é a figura de ruído do receptor do radar altimétrico. Portanto, com base nas Equações 2 e 3, a razão interferência-ruído ( $\frac{I}{N}$ ) pode ser calculada e então comparada com o critério de proteção da Rec. ITU-R M.2059.

### B. Dessensibilização

Em países nos quais a autoridade regulatória licitou a subfaixa de 3,7 GHz a 3,98 GHz para operação 5G, os estudos de convivência se ativeram principalmente à chance de saturação dos radares altimétricos causadas pelas emissões fundamentais das estações base. Com a separação espectral empregada no caso brasileiro, o foco da possibilidade de convivência é desviado para as chances de dessensibilização ( $D$ ) do radar causada por emissões espúrias [11]:

$$D = 10 \log_{10} \left( \frac{i+n}{n} \right), \quad (4)$$

onde  $i$  e  $n$  são os níveis de interferência e ruído em escala linear.  $D = 1$  dB quando  $\frac{I}{N} = -6$  dB.

O exercício a seguir ilustra como uma maior separação espectral foi instrumental na mitigação de potenciais interferências prejudiciais:

- Podendo o nível de interferência  $I$  ser escrito como  $N + \frac{I}{N}$ , depreende-se então que o nível recebido de emissões espúrias não deve ser superior a  $(N - 6)$  dB.
- Aplicando-se valores de referência de  $N_F = 8$  dB e  $BW_{RA} = 150$  MHz à Equação 3, o limite de densidade espectral de potência resultante é de  $-172$  dBm/Hz.
- Para uma única estação base com antena não integrada e sem formação de feixe (*beamforming*), de potência equivalente isotropicamente radiada (e.i.r.p.) numericamente igual ao seu limite de espúrios ( $-30$  dBm/MHz) [12], com apontamento direto para o radar e com perdas de propagação calculadas pelo modelo de perda de percurso em espaço livre, uma densidade espectral de potência de  $-172$  dBm/Hz é recebida pelo radar a uma distância aproximada da estação base de somente 3 (três) metros.

A rigor, a largura de faixa aplicada à Equação 3 é a largura da faixa em frequência intermediária (FI) ( $BW_{FI}$ ) do detetor, ou seja, obtida após a soma linear dos níveis do sinal interferente e do sinal do radar, seguida de um filtro passa-baixas de FI [10]. O ciclo de trabalho (*duty cycle*) de interferência ( $R_s$ ) é dado pela razão entre a potência interferente dentro da faixa de FI e a potência interferente total recebida, e pode ser escrita da forma:

$$R_s = \frac{2BW_{FI}}{BW_{chirp}}, \quad (5)$$

onde  $BW_{chirp}$  é a largura de faixa do sinal de varredura (*chirp*). Logo, a razão propriamente dita pode ser expressa da forma:

$$I_D = I - 10 \log_{10}(R_s), \quad (6)$$

onde  $I_D$  é a potência interferente no detetor. Desta forma, é possível avaliar o critério de proteção de  $-6$  dB, expresso por  $\frac{I_{limiar}}{N}$  na cadeia de processamento de sinais do receptor do radar altimétrico. Logo, se  $I_D > I_{limiar}$ , componentes espectrais poderão causar a detecção de falsas altitudes.

### III. CADEIA DE PROCESSAMENTO DE SINAIS DE UM RADAR ALTIMÉTRICO

Radares altimétricos enviam sinais de onda contínua em frequência modulada (*frequency modulated continuous wave* – FMCW) de varredura triangular e filtram o sinal recebido tentando identificar o sinal original refletido. A varredura triangular de um sinal transmitido e de um sinal recebido pelo radar é ilustrada na Figura 2. O sinal recebido é uma cópia em atraso do sinal transmitido e a altitude de uma aeronave, portanto, é estimada em função deste atraso  $\Delta t$ . Como a varredura acontece numa largura  $B$ , a diferença em frequência entre os sinais transmitido e recebido  $f_d$  (ou as diferenças na varredura de subida  $f_{bu}$  e de descida  $f_{bd}$ , denominadas frequências de batimento), é constante. E sendo a varredura linear, o tempo de ida e volta  $\Delta t$  pode ser obtido a partir de  $f_b$  e, conseqüentemente, a altitude da aeronave pode ser estimada.

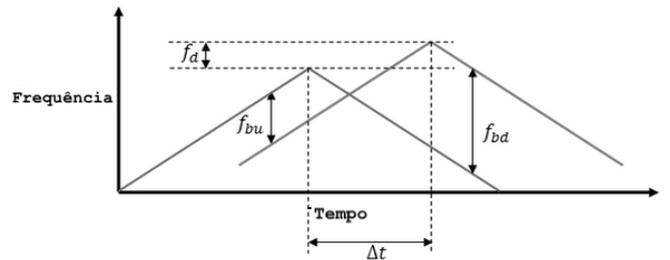


Fig. 2: Varredura triangular FM de um sinal CW transmitido e de sua cópia recebida com um atraso de  $\Delta t$  e diferença em frequência  $f_d$ .  $f_{bu}$  e  $f_{bd}$  são as frequências de batimento

A cadeia de processamento de sinais de um receptor de radar altimétrico é composta por um filtro casado para eliminação do ruído aditivo gaussiano branco, seguido de um controle automático de ganho para manutenção de uma amplitude constante, e de um bloco de detecção de taxa constante de alarmes falsos (*Constant False-Alarm Rate* – CFAR), cujo diagrama em blocos é ilustrado na Figura 3. Cada um dos blocos é descrito nas subseções que se seguem.



Fig. 3: Diagrama em blocos do modelo de radar altimétrico.

### A. Filtro casado

Em processamento de sinais, a saída de um filtro casado é dada pela correlação de um sinal conhecido (*template*) com um sinal desconhecido para nele ser identificada a presença do próprio *template*. É considerado o filtro linear ótimo  $h$  para se maximizar uma relação sinal-ruído (RSR) na presença de ruído aditivo [13]. A filtragem casada no domínio do tempo, para sinais de tempo discreto, pode ser escrita da forma:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[n-k]x[k], \quad (7)$$

onde  $x[k]$  é o sinal de entrada como função da variável independente  $k$ ,  $h$  é o filtro linear ótimo supracitado, e  $y[n]$  é a saída filtrada no  $n$ -ésimo instante amostral. Sendo o sinal de entrada  $x$  composto pela soma do sinal desejado  $s$  com o ruído aditivo  $r$ , e  $R_r$  a matriz de autocorrelação do ruído, o filtro casado ótimo, ou seja, aquele que maximiza a RSR, é definido como

$$h = \frac{1}{\sqrt{s^H R_r^{-1} s}} R_r^{-1} s, \quad (8)$$

onde  $R_r^{-1}$  é a matriz inversa de  $R_r$ , e  $s^H$  é a matriz hermitiana (ou o transposto conjugado) de  $s$ .

### B. Controle Automático de Ganho (CAG)

O uso do CAG em radares tem por objetivo a eliminação de ecos provenientes da morfologia do solo (*clutter*), ao manter o sinal de saída estável [14].

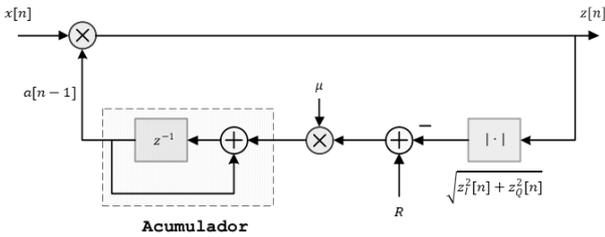


Fig. 4: Diagrama de CAG

No diagrama em blocos da Figura 4, o sinal de entrada  $x[n]$  é multiplicado pelo sinal de saída do CAG  $a[n]$ , produzindo um sinal complexo de saída  $z[n]$ , cuja magnitude pode ser expressa da forma:

$$|z[n]| = \sqrt{z_I^2[n] + z_Q^2[n]} = |a[n-1] \cdot x[n]|, \quad (9)$$

onde  $z_I^2[n]$  e  $z_Q^2[n]$  são as decomposições de  $z[n]$  em fase e em quadratura.

O nível de referência  $R$  é o alvo de estabilização de  $z[n]$  após a operação de ganho. Para tanto, um sinal de erro é produzido da forma

$$e[n] = R - |a[n-1] \cdot x[n]|, \quad (10)$$

e a atualização da amplitude do sinal de saída pode ser escrita como

$$a[n] = a[n-1] + \mu \cdot e[n], \quad (11)$$

onde  $\mu$  é o tamanho do passo, expresso como uma fração da taxa de amostragem do sinal.

### C. Detetor CFAR

A detecção de um radar, da forma mais direta possível, consiste em comparar o sinal de entrada com um determinado limiar. A tarefa reside na definição de um limiar apropriado, dependente da probabilidade de detecção e da probabilidade de alarme falso. A técnica CFAR é empregada quando as características espectrais e de potência do ruído são desconhecidas.

O detetor CFAR empregado é do tipo calculador de média de células (*cell averaging*). Quando há uma tentativa de detecção numa dada célula (conjunto de amostras) do sinal, denominada célula sob teste (*cell under test – CUT*), a potência de ruído é estimada a partir das células vizinhas, também chamadas de células de treinamento. A Figura 5 ilustra esta relação entre células. Células de guarda são definidas entre a CUT e as células de treinamento, com o propósito de evitar que componentes de sinal da CUT contribuam para a estimação de ruído. As células de treinamento anteriores e posteriores são de mesmo número.

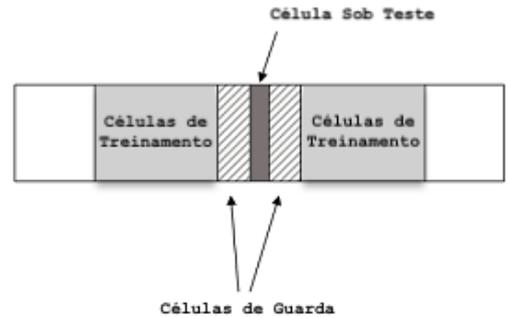


Fig. 5: Relação entre células de amostras na detecção CFAR

O limiar de detecção  $L$  é dado por [15]:

$$L = \alpha P_n, \quad (12)$$

onde  $P_n$  é a potência estimada do ruído e  $\alpha$  é um fator de escala denominado “fator de limiar”. O cômputo de  $P_n$  é feito da forma:

$$P_n = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_m, \quad (13)$$

onde  $N$  é o número de células de treinamento e  $x_m$  é a amostra de sinal em cada célula de treinamento. O fator de limiar  $\alpha$  pode então ser escrito como:

$$\alpha = N \left( P_{fa}^{-\frac{1}{N}} - 1 \right), \quad (14)$$

onde  $P_{fa}$  é a probabilidade de alarmes falsos.

## IV. EXPERIMENTO

O cenário do experimento consiste na emissão de uma forma de onda FMCW emitida por um radar altimétrico durante a aterrissagem de uma aeronave, a partir de uma altitude de 430 metros, com velocidade de solo aproximada de 120 m/s. A onda refletida é processada numa leitura de altitude pelo radar altimétrico modelado conforme o diagrama em blocos da Figura 3. O filtro casado identifica a forma de onda FMCW no sinal recebido ao assumí-lo como uma versão atenuada e

deslocada em fase do sinal transmitido, o CAG entrega ao detector CFAR um sinal de nível constante para uma adequada estimação do ruído e discriminação dos picos de sinal para estimação da altitude. O detector tem duas células de guarda,  $N = 50$ , e ( $P_{fa} = 10^{-7}$ ). Os parâmetros de RF do radar correspondem aos do radioaltímetro digital D1, constante da Tabela 2 da Rec. ITU-R M.2059.

TABELA I: Parâmetros de RF do radar altimétrico.

Frequência central	4,3 GHz
Largura de faixa	150 MHz
Frequência de repetição	143 Hz
Modulação	FMCW
Figura de ruído	8 dB
Largura de FI	0,312 MHz
Ponto de compressão de 1 dB	-30 dBm

A partir da frequência de repetição de pulsos (PRF) e da largura de faixa ( $BW_{\text{chirp}}$ ) na Tabela I, calcula-se o tempo de varredura ( $t_{\text{sweep}}$ ), dado por  $\frac{1}{2*PRF}$  e a taxa de amostragem ( $f_s$ ), dada por  $\frac{BW_{\text{chirp}}*t_{\text{sweep}}}{t_{\text{sweep}}}$  para geração da forma de onda FMCW. A partir da largura de FI e da figura de ruído,  $N$  e  $I_D$  são calculados pelas Equações 3, 5 e 6.

Para observar o impacto do sinal interferente na dessensibilização ( $D$ ) do receptor do radar altimétrico e, conseqüentemente, no seu desempenho, seu piso de ruído foi gradativamente aumentado pela incidência de  $I_D$ . A relação entre  $I$  e  $I_D$  é dada pela Equação 6 e o aumento do piso de ruído causado pela presença de  $I$  é verificado pela Equação 4.  $D$  assume valores de 0 a 15 dB, numa escala limitada pela margem encontrada pelo estudo de compatibilidade em [7].

## V. RESULTADOS

O erro de estimação por altitude conforme o aumento da dessensibilização é ilustrado na Figura 6. O efeito da excursão de  $D$  ao longo da margem diminui conforme a aeronave se aproxima do solo e se torna mais pronunciado em altitudes maiores, pois os sinais recebidos sofrem mais alterações devido às condições de propagação e as estimativas são realizadas a partir de valores maiores de  $\Delta t$ ,  $f_{bu}$  e  $f_{bd}$ .

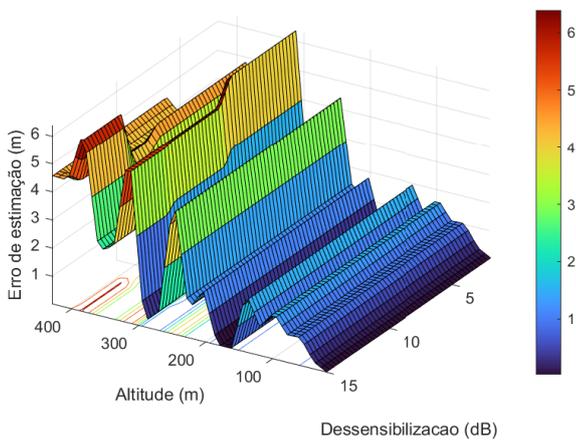


Fig. 6: Erros de estimação por altitude e dessensibilização.

Quando  $D$  aumenta, a potência do ruído estimada pelo detector ( $P_n$ ) também aumenta, resultando num limiar de detecção ( $L$ ) mais alto (Ver Equações 12 e 13). A estimação do ponto mais alto da trajetória é ilustrada nas Figuras 7 e 8. Os marcadores dos picos de sinal identificam as estimativas de altitude, i.e., altitudes nas quais o nível de sinal é superior ao limiar de detecção, correspondente ao ruído calculado pelo algoritmo CFAR. A altitude estimada corresponde ao pico máximo de detecção. A linha vertical pontilhada corresponde a altitude verdadeira da aeronave.

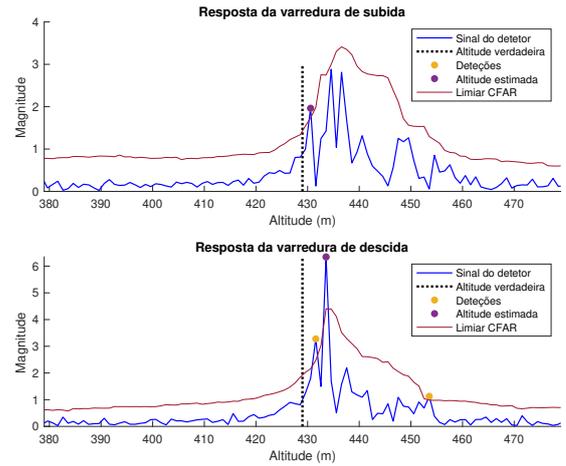


Fig. 7: Resposta do radar altimétrico ( $D = 1$  dB).

O receptor do radar altimétrico foi então gradativamente dessensibilizado até 15 dB, limite para o qual foi observada a falha total na estimação de altitude. A Figura 8 ilustra essa condição limite. Note que o piso de ruído estimado pelo algoritmo CFAR, caracterizado pela envoltória do limiar de detecção, é bem superior ao ilustrado na Figura 7, ocasionando a falha na detecção da varredura de subida e suprimindo detecções candidatas na varredura de descida da onda FMCW.

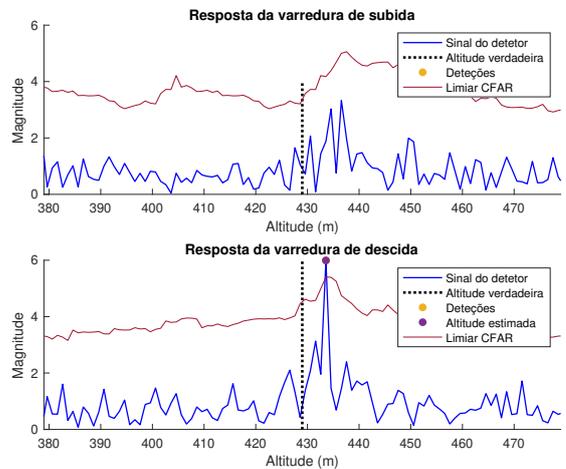


Fig. 8: Resposta do radar altimétrico ( $D = 15$  dB).

## VI. DISCUSSÃO

Nesse experimento, foi possível observar que o efeito da altitude verdadeira da aeronave sobre o erro de estimação é mais significativo do que o efeito da dessensibilização do receptor do radar, desde que a excursão de  $D$  não seja superior à margem identificada (Ver Seção I). Diferentes probabilidades de alarme falso ( $P_{fa}$ ) também foram testadas, sem impactos significativos sobre as altitudes estimadas. Trabalhos futuros poderão examinar a aterrissagem a partir de altitudes maiores que as trabalhadas nesta simulação, bem como aumentar o piso de ruído para além da margem do sistema e verificar se uma sintonia adequada da  $P_{fa}$  impediria um aumento significativo do erro de detecção nessas condições.

Quanto à proteção dos radares, os estudos de convivência citados na Seção I que simularam redes celulares operando em frequências superiores a 3,7 GHz, identificaram distâncias limite de separação de aproximadamente 50 metros [4] e de 82 metros [5] para ambientes urbanos, utilizando como critério de proteção a mesma dessensibilização ( $D = 1$  dB) considerada na Subseção II-B, na qual a estimação de pior caso identificou uma distância de separação de 3 (três) metros quando de uma separação espectral de 500 MHz entre as faixas de operação das estações base e dos radioaltímetros.

Por outro lado, a separação espectral enquanto técnica de mitigação de interferências é tão efetiva quanto o filtro de RF do receptor vítima for seletivo o suficiente para protegê-lo. Sua saturação é dada quando a interferência agregada é superior ao seu ponto de compressão de 1 dB. O valor correspondente na Tabela I é tão mais facilmente atingido quanto menor for o fator de *roll-off* do filtro de RF. A Tabela 3 da Recomendação ITU-R M.2059 indica um fator de 24 dB por oitava para frequências inferiores a 4200 MHz [10]. Espera-se, portanto, que emissões no limite do espectro autorizado (a 3700 MHz) sejam atenuadas em aproximadamente 7 dB. Se voltarmos ao cenário exemplo da Subseção II-B, com a mesma estação base 5G, operando em seu limite máximo de emissões fundamentais (55 dBm/MHz) [12], a máxima interferência agregada admitida em apontamento direto seria atingida a uma distância de aproximadamente 700 metros.

Por mais que este artigo tenha trabalhado com considerações de emissões espúrias de estações 5G e avaliado seus efeitos nas altitudes estimadas pelos radares, restrições de apontamento das antenas das estações base são muito importantes para manter a interferência agregada causada pelas emissões fundamentais em patamares mínimos. Estas restrições devem ser aplicadas em áreas circulares ou retangulares no entorno da pista de decolagem, cujos raios ou bases sejam superiores à distância limite de apontamento direto.

## VII. CONCLUSÃO

Este trabalho observou a convivência entre estações base 5G operando na faixa de 3,5 GHz e radares altimétricos em operação na faixa de 4,3 GHz, não com base na tradicional estimação da probabilidade de se exceder o critério de proteção dos radares, mas a partir da avaliação do desempenho destes

mesmos radioaltímetros quando dessensibilizados. Para tanto, um modelo de processamento de sinais foi desenvolvido, tal que se pudesse ilustrar o impacto da interferência prejudicial na própria estimação de altitude.

Se por um lado, pôde-se observar que a separação espectral de 500 MHz adotada pelo regulador brasileiro teve sucesso na mitigação do efeito da dessensibilização causada por emissões espúrias, para se mitigar o efeito da saturação causada por emissões fundamentais, é preciso aliar restrições de apontamento de antenas com filtros de RF com alta seletividade. Até a data de redação deste artigo, os apontamentos dos feixes principais das estações base são limitados à linha do horizonte ou abaixo em áreas de restrição retangulares por aeródromo, compreendidas pelas distâncias de 2100 metros das extremidades da pista de pouso e decolagem e 910 metros de cada lado do eixo central da pista. A leitura de [8] e de suas referências é recomendada para uma compreensão detalhada do racional empregado na determinação das medidas de proteção dos radares altimétricos contra interferências prejudiciais.

## REFERÊNCIAS

- [1] União Internacional de Telecomunicações - Setor de Radiocomunicação, Genebra, *Resolution 245 (WRC-19) – Studies on frequency-related matters for the terrestrial component of International Mobile Telecommunications identification in the frequency bands 3300-3400 MHz, 3600-3800 MHz, 6425-7025 MHz, 7025-7125 MHz and 10.0-10.5 GHz*, Nov. 2019.
- [2] RTCA, *Paper No. 274-20/PMC-2073 Assessment of C-Band Mobile Telecommunications Interference Impact on Low Range Radar Altimeter Operations*. Radio Technical Commission for Aeronautics, Washington, 1 ed., 10 2020.
- [3] J. Bukhari and W. Mérida, “5G interference with aviation altimeters: technology and policy recommendations for coexistence,” *Transport Policy*, vol. 153, pp. 1–11, 2024.
- [4] W. Chen, M. Li, R. Liu, S. Sun, M. Chen, and X. Jiang, “Radio altimeter compatibility analysis with 5G systems,” in *Ninth International Symposium on Sensors, Mechatronics, and Automation System (ISSMAS 2023)*, vol. 12981, pp. 1126–1131, SPIE, 2024.
- [5] J. Li, S. Liu, H. Lu, and S.-H. Hwang, “Coexistence of 5G Communication Systems with Radar Altimeters,” *IEEE Access*, 2024.
- [6] Agência Nacional de Telecomunicações, Brasília, *Resolução nº 711, de 28 de maio de 2019 – Destina faixas de radiofrequências e aprova o Regulamento sobre Condições de Uso da Faixa de Radiofrequências de 3,5 GHz*, May 2019.
- [7] Agência Nacional de Telecomunicações, Brasília, *Estudo de compatibilidade entre IMT 2020 e Radioaltímetros*, May 2022.
- [8] Agência Nacional de Telecomunicações, Brasília, *Ato nº 9.064, de 28 de junho de 2022*.
- [9] União Internacional de Telecomunicações - Setor de Radiocomunicação, Genebra, *ITU-R M 2101: Modelling and simulation of IMT networks and systems for use in sharing and compatibility studies*, Feb. 2017.
- [10] União Internacional de Telecomunicações - Setor de Radiocomunicação, Genebra, *ITU-R M 2059: Operational and technical characteristics and protection criteria of radio altimeters utilizing the band 4200-4400 MHz*, Feb. 2014.
- [11] J. Gavan, “Analysis of desensitization effects on radio systems,” in *1984 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1–7, 1984.
- [12] Agência Nacional de Telecomunicações, Brasília, *Requisitos Técnicos e Operacionais de Uso das faixas de frequências associadas aos serviços de interesse coletivo*.
- [13] G. Turin, “An introduction to matched filters,” *IRE Transactions on Information Theory*, vol. 6, no. 3, pp. 311–329, 1960.
- [14] M. I. Skolnik et al., *Introduction to radar systems*, vol. 3. McGraw-hill New York, 1980.
- [15] M. A. Richards et al., *Fundamentals of radar signal processing*, vol. 1. McGraw-hill New York, 2005.