

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

RENAN CIRINO BAIRRAL BUENO

**Minimização da intensidade dos lóbulos secundários em sistemas
de radares de abertura sintética**

São João da Boa Vista

2023

Renan Cirino Bairral Bueno

**Minimização da intensidade dos lóbulos secundários em sistemas
de radares de abertura sintética :**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações .

Orientador: Profº Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde

São João da Boa Vista

2023

B928m Bueno, Renan Cirino Bairral
Minimização da intensidade dos lóbulos secundários em sistemas de radares de abertura sintética / Renan Cirino Bairral Bueno. -- São João da Boa Vista, 2023
44 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista
Orientador: Ivan Aritz Aldaya Garde

1. Radar de abertura sintética. 2. Processamento de sinais Técnicas digitais. 3. Antenas de Microondas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MINIMIZAÇÃO DA INTENSIDADE DOS LÓBULOS SECUNDÁRIOS EM
SISTEMAS DE RADARES DE ABERTURA SINTÉTICA**

Aluno: Renan Cirino Bairral Bueno
Orientador: Prof. Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde

Banca Examinadora:

- Ivan Aritz Aldaya Garde (Orientador)
- Marlon Rodrigues Garcia (Examinador)
- Rafael Abrantes Penchel (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Processo nº 273/2023)
--

São João da Boa Vista, 08 de dezembro de 2023

Dedico este trabalho à minha família, namorada e amigos, agradecendo por nunca desistirem de me apoiar, sendo a inspiração crucial para minha jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar profundos agradecimentos àqueles que desempenharam papéis cruciais ao longo desta jornada acadêmica e pessoal.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, João Aparecido Bueno e Maria Madalena Bairral Bueno, pela constante ajuda, motivação e pela educação de qualidade que me proporcionaram. Seu apoio incansável, crença nos meus sonhos e esforços para oferecer as melhores oportunidades não têm preço. Amo vocês.

Aos meus irmãos, Rafael Bairral Bueno e Rodolfo Bairral Bueno, expresso minha gratidão por sempre me guiarem na busca por ser uma pessoa melhor e por nunca deixarem de estar ao meu lado.

À minha namorada, Thainara Pieroni Fidencio, uma das minhas grandes fontes de motivação. Sua presença constante, apoio, crença e amor foram fundamentais. Obrigado por ser minha melhor amiga, companheira e uma das minhas bases.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde, pela orientação neste trabalho, sempre pronto a ajudar e guiar.

Aos professores, Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel e Prof. Dr. Marlon Rodrigues Garcia, que aceitaram participar da banca e avaliar este trabalho.

Aos amigos de moradia, Felipe Franco Martins, Leonardo Mendes da Silva, Raphael Parreira de Souza e Thierry de Oliveira Ronchi, meu sincero agradecimento por estarem ao meu lado nos altos e baixos, por motivarem e arrancarem os meus sorrisos mais verdadeiros.

Aos amigos e amigas, Arthur Terra, Aime Jordan, Enzo Costa, Igor Carvalho, Larissa Labegallini, Luis Tapia, Luiza Cardoso, Renato Braganhole e Thamiris Pieroni, que ao longo desses anos compartilharam risadas e proporcionaram experiências valiosas.

Por fim, meu agradecimento a todas as pessoas que passaram pela minha vida, cada uma contribuindo com experiências, conhecimentos e perspectivas únicas que enriqueceram tanto minha formação acadêmica quanto minha jornada pessoal.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”
(Albert Einstein)*

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso (TCC) aborda a temática da minimização da intensidade dos lóbulos secundários em sistemas de radares de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar*, SAR). O estudo aborda estratégias e métodos destinados a minimizar a presença dos lóbulos secundários, com o objetivo de aprimorar a qualidade das imagens produzidas pelos radares SAR. A análise abrange uma revisão do equacionamento básico de um SAR, a descrição do diagrama de blocos do processamento do pulso e simulações realizadas utilizando a TOOLBOX do MATLAB. Os parâmetros adotados foram os seguintes: a altitude utilizada foi fixada em 2000 km, a largura do radar foi estabelecida em 4 m. Quanto às frequências empregadas, foram selecionadas as faixas de 4 GHz e 8 GHz. A velocidade do sistema foi variada considerando três valores distintos: 7000 m/s, 7500 m/s e 8000 m/s. Adicionalmente, o comprimento do radar foi modificado, abrangendo as dimensões de 4 m, 12 m e 20 m. Os resultados deste trabalho oferecem contribuições valiosas para o avanço e a otimização de sistemas de radares de abertura sintética, beneficiando diversas aplicações que dependem de imagens precisas e confiáveis. Além disso, o presente trabalho visa representar uma introdução mais amigável para futuros estudantes que desejam realizar os seus projetos na área de radares SAR.

PALAVRAS-CHAVE: SAR. Minimização de Lóbulos Secundários. Radar. Abertura. Sintética. Processamento de sinais Técnicas digitais. Antenas de Microondas. Radar de abertura sintética.

ABSTRACT

This undergraduate thesis (TCC) addresses the theme of minimizing the intensity of secondary lobes in synthetic aperture radar (SAR) systems. The study explores strategies and methods aimed at minimizing the presence of secondary lobes with the objective of enhancing the quality of images produced by SAR radars. The analysis includes a review of the basic equations of SAR, a description of the pulse processing block diagram, and simulations conducted using the MATLAB Toolbox. The adopted parameters were as follows: the altitude was set at 2000 km, and the radar width was established at 4 m. Regarding the frequencies used, the ranges of 4 GHz and 8 GHz were selected. The system's speed varied with three different values: 7000 m/s, 7500 m/s, and 8000 m/s. Additionally, the radar length was modified, covering dimensions of 4 m, 12 m, and 20 m. The results of this work provide valuable contributions to the advancement and optimization of synthetic aperture radar systems, benefiting various applications that rely on precise and reliable images. Furthermore, this study aims to serve as a more user-friendly introduction for future students interested in conducting projects in the field of SAR radar.

KEYWORDS: SAR. Minimization of Secondary Lobes. Radar. Synthetic Aperture. Synthetic aperture radar. Microwave Antennas. Signal Processing Techniques digital.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Sistemas SAR.	14
Figura 2	Configurações SAR.	15
Figura 3	Modelo de um SAR.	19
Figura 4	Modelo de um SAR com os parâmetros do intervalo cruzado.	20
Figura 5	Etapas básicas de um SAR.	24
Figura 6	Primeira parte do diagrama de blocos do processamento de pulsos.	25
Figura 7	Segunda parte do diagrama de blocos do processamento de pulsos.	26
Figura 8	Filtro adicionado na segunda parte do diagrama de blocos do processamento de pulsos.	27
Figura 9	Diagrama de blocos do processamento dos pulsos.	27
Figura 10	Valores de PRF em termos das dimensões físicas e da velocidade	29
Figura 11	Simulação 1 - Frequência de 4 GHz, velocidade de 7000 m/s e comprimento de 20 m	31
Figura 12	Simulação 2 - Frequência de 4 GHz, velocidade de 8000 m/s e comprimento de 20 m	31
Figura 13	Simulação 3 - Frequência de 4 GHz, velocidade de 7500 m/s e comprimento de 12 m	32
Figura 14	Simulação 4 - Frequência de 4 GHz, velocidade de 7000 m/s e comprimento de 4 m	33
Figura 15	Simulação 5 - Frequência de 4 GHz, velocidade de 8000 m/s e comprimento de 4 m	33
Figura 16	Simulação 6 - Frequência de 8 GHz, velocidade de 7000 m/s e comprimento de 20 m	34
Figura 17	Simulação 7 - Frequência de 8 GHz, velocidade de 8000 m/s e comprimento de 20 m	35
Figura 18	Simulação 8 - Frequência de 8 GHz, velocidade de 7500 m/s e comprimento de 12 m	35
Figura 19	Simulação 9 - Frequência de 8 GHz, velocidade de 7000 m/s e comprimento de 4 m	36
Figura 20	Simulação 10 - Frequência de 8 GHz, velocidade de 8000 m/s e comprimento de 4 m	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros das simulações	30
Tabela 2 – Parâmetros e valores obtidos das simulações	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UNESP	Universidade Estadual Paulista
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i> (Radar de abertura sintética)
VANTs	Veículo aéreo não tripulado
FMCW	<i>Focused Frequency Domain Pulses at the Look Point</i> (Pulsos no domínio da frequência focados no ponto de mira)
SLL	Side Lobe Level (nível do lóbulo lateral)

LISTA DE SÍMBOLOS

c	Velocidade da luz
B	Largura de banda
R	Faixa inclinada (<i>slant-range</i>)
λ	Comprimento de onda
D	Abertura da antena
Δ_{cr}	Resolução do intervalo cruzado (<i>cross-range</i>)
L_{SA}	Comprimento da abertura sintética
R_G	Alcance terrestre
v	Velocidade
h	Altitude
ϕ	Angulo do feixe em relação a vertical
R_{CR}	Alcance cruzado no solo
R_{AR}	Alcance ao longo do solo
δR_{CR}	Resolução do intervalo cruzado
δR_{AR}	Resolução ao longo do solo
SA	Matriz sintética

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa dos radares de abertura sintética	14
1.2	Tipos de radares de abertura sintética	14
1.3	Parâmetros	16
1.4	Problemas dos radares de abertura sintética	16
1.5	Contribuições	17
1.6	Estrutura	17
2	EQUACIONAMENTO DO SISTEMA E PROCESSAMENTO DE SINAL	19
2.1	Equacionamento do sistema	19
2.1.1	Intervalo cruzado	20
2.1.2	Frequência de repetição de pulso	21
2.1.3	Lóbulos secundários	22
2.2	Processamento de sinal	24
3	RESULTADOS	29
4	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS	40
	ANEXO A – TOOLBOX DO MATLAB	41

1 INTRODUÇÃO

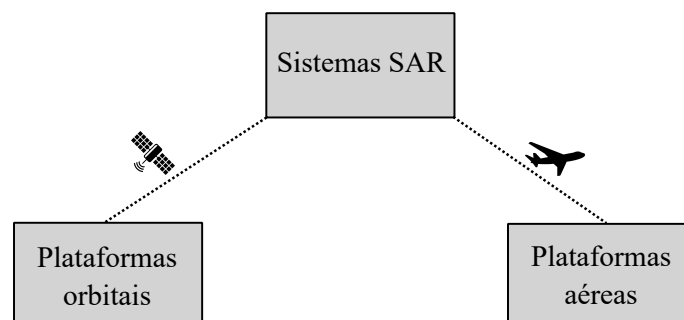
1.1 JUSTIFICATIVA DOS RADARES DE ABERTURA SINTÉTICA

O radar de abertura sintética (SAR *Synthetic Aperture Radar*), demonstrado pela primeira vez no início dos anos 1950, é uma alternativa mais utilizadas para detecção e rastreamento [Wehner 1994]. Em um radar convencional, a resolução da imagem está diretamente relacionada ao tamanho da antena. Antenas maiores proporcionam uma resolução melhor, permitindo a detecção de detalhes menores. No entanto, antenas grandes podem ser impraticáveis, especialmente em aplicações aeroespaciais, devido a restrições de peso e espaço. No SAR, em vez de depender de uma antena física grande, utiliza-se um método de processamento de sinais para criar uma "abertura sintética" virtual. Isso é alcançado movendo a antena física ao longo de uma trajetória conhecida, como em um satélite ou aeronave em movimento. Os sinais de retorno coletados de diferentes posições são combinados e processados para simular uma antena muito maior do que a antena física. Essencialmente, a abertura sintética permite que o SAR alcance uma resolução de imagem comparável àquela que seria obtida com uma antena do tamanho da abertura sintética virtual. O radar SAR opera emitindo pulsos de ondas de rádio em direção à superfície da Terra. Essas ondas são refletidas pelas características da superfície, como edifícios, árvores, montanhas e corpos de água. O radar registra o tempo que as ondas levam para retornar ao sensor, bem como a intensidade do sinal refletido. Ao combinar essas informações coletadas de diferentes posições da antena, o sistema é capaz de sintetizar uma imagem de alta resolução espacial da área observada.

1.2 TIPOS DE RADARES DE ABERTURA SINTÉTICA

Os SAR's são divididos em dois tipos de sistemas, como ilustrado na Figura 1

Figura 1 – Sistemas SAR.

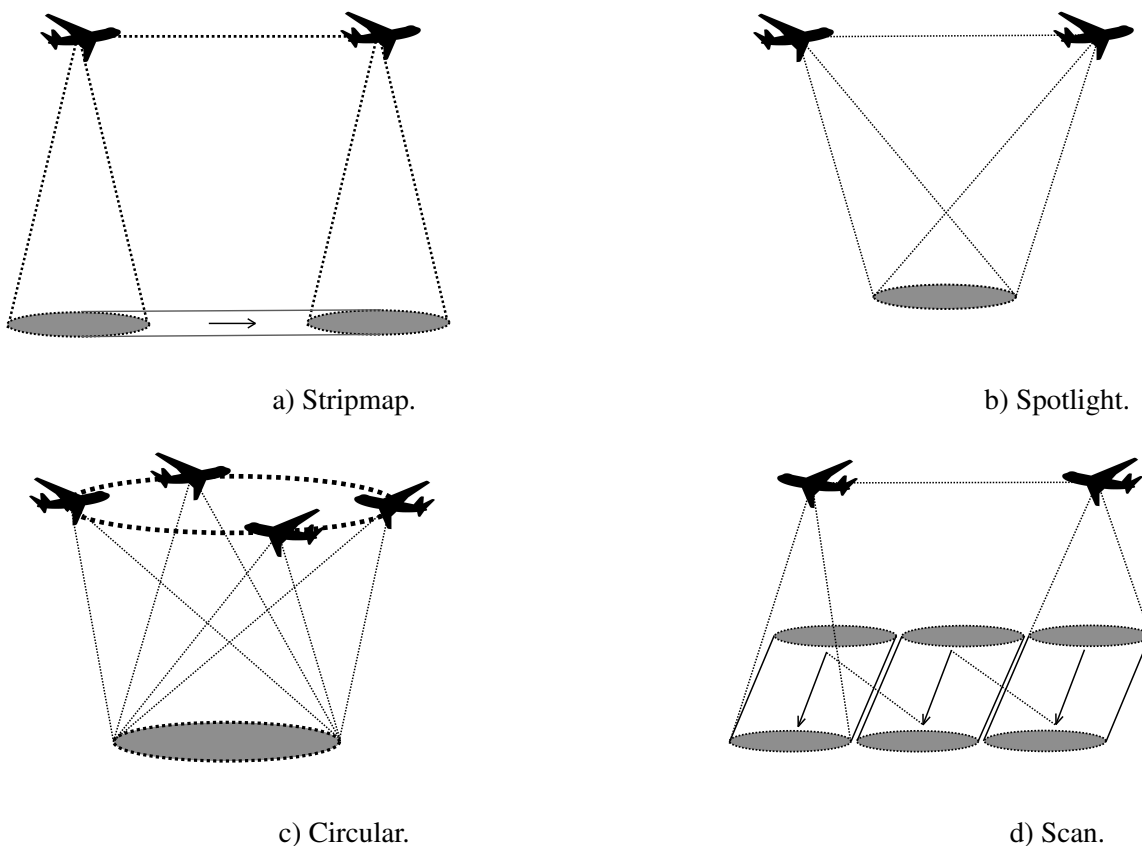


Fonte: Produção do próprio autor.

Existem dois tipos de sistemas SAR, os que fazem uso de plataformas orbitais e os que fazem uso de plataformas aéreas. As plataformas orbitais atuam na órbita baixa da terra, também conhecido como

LEO (*Low Earth Orbit*), onde a altitude varia de 160 km a 2000 km acima da superfície terrestre. Nesta órbita, os satélites apresentam a capacidade de capturar imagens de alta resolução em um intervalo de tempo mais curto para uma área específica, característica conhecida como tempo de revisitação. Em outras palavras, o tempo de revisitação refere-se ao período necessário para que um satélite retorne e colete novas informações sobre uma mesma região geográfica. Quanto menor o tempo de revisitação, mais frequentemente o satélite pode sobrevoar e atualizar os dados da área em questão, proporcionando uma monitorização mais regular e atualizada. Já as plataformas aéreas, são um conjunto de veículos que operam na atmosfera da terra, estes veículos são, aeronaves militares, aeronaves de pesquisa, veículos aéreos não tripulados (VANTs), entre outros. Dentro destes sistemas SAR existem alguns modos de operação, como ilustrado na **Figura 2**

Figura 2 – Configurações SAR.



Fonte: Produção do próprio autor.

- **a) *Stripmap*:** No modo *stripmap*, a antena permanece fixa em relação a plataforma, enquanto a mesma se move ao longo de sua trajetória. Conforme a plataforma avança, a antena emite pulsos em uma faixa angular estreita contínua.
- **b) *Spotlight*:** No modo *spotlight*, a antena do radar é direcionada para um alvo específico na superfície terrestre. Ao contrário do modo *stripmap*, onde uma faixa mais ampla é observada, no modo *spotlight* a atenção é concentrada em um alvo específico.
- **c) *Circular*:** No modo circular, a plataforma faz sua trajetória em torno do alvo, semelhante ao modo *spotlight*, mas formando um círculo.

- **d) Scan:** No modo *scan*, a plataforma é direcionada em diferentes ângulos para coletar dados. Esse processo pode ser usado para criar imagens de uma área mais ampla ou para obter informações de diferentes ângulos, melhorando a capacidade de observação do radar

1.3 PARÂMETROS

Os principais parâmetros de um sistema SAR são os seguintes:

- **Frequência:** Em radares SAR, a frequência do sinal impacta na resolução espacial e a capacidade de penetração. Frequências mais altas oferecem maior detalhamento, enquanto frequências mais baixas podem penetrar densas coberturas vegetais. A escolha da banda de frequência, como X, C, ou L, é crucial para otimizar o desempenho do radar conforme as características da área de interesse.
- **Velocidade:** Refere-se à velocidade relativa entre o radar e a superfície terrestre. Essa medida é essencial para a correta formação de imagens SAR, influenciando diretamente a distorção Doppler e garantindo a precisão das informações de localização na imagem final. A variação da velocidade ao longo do tempo é crucial para a correta compensação Doppler e a formação de imagens coerentes e georreferenciadas.
- **Altitude:** Refere-se à altura da antena do radar acima da superfície terrestre. A precisão na medida da altitude é crucial para corrigir distorções geométricas nas imagens SAR, garantindo uma representação espacial correta dos alvos na superfície.
- **Comprimento:** Refere-se à dimensão física ou extensão da antena na direção azimutal, ou seja, ao longo do movimento da antena. Um comprimento de antena maior permite ao SAR sintetizar uma "antena virtual" mais longa, resultando em uma resolução radial mais apurada.
- **Largura:** Refere-se à dimensão física que é perpendicular ao movimento da antena. Uma largura de antena maior possibilita ao SAR sintetizar uma "antena virtual" mais longa nessa direção, resultando em uma resolução azimutal mais fina.
- **Largura de banda:** Refere-se à faixa de frequências utilizadas para transmitir e receber sinais. Em SAR, a largura de banda está diretamente relacionada à resolução da imagem. Uma largura de banda maior permite a transmissão de sinais com frequências mais altas, o que, por sua vez, contribui para uma resolução espacial mais fina. Em outras palavras, uma largura de banda ampla possibilita ao SAR distinguir com maior precisão entre diferentes objetos na cena, resultando em imagens mais detalhadas.

1.4 PROBLEMAS DOS RADARES DE ABERTURA SINTÉTICA

O SAR enfrenta desafios consideráveis que impactam diretamente a qualidade das imagens adquiridas. Um dos problemas destacados é a degradação das imagens causada pelo ruído dependente de sinal, conhecido como *speckle*, resultante da natureza coerente da radiação emitida pelo radar [Furry

[1995]. O *speckle* é uma consequência da interferência construtiva e destrutiva de ondas coerentes que interagem durante o processo de formação da imagem. Essas interferências podem resultar em variações rápidas e aleatórias na intensidade dos *pixels*, criando uma textura granular na imagem final.

Além disso, o processo de automatização no processamento de imagens de sensores remotos orbitais é reconhecido como um desafio significativo [Falqueto 2018]. A automação é crucial para lidar com grandes volumes de dados, mas sua implementação eficaz em contextos orbitais requer considerações específicas, como a adaptação a variações atmosféricas e de iluminação, entre outros fatores.

Outro desafio abordado neste trabalho diz respeito à presença de lóbulos laterais. Esses lóbulos laterais, quando presentes nas imagens SAR, podem induzir a formação de objetos falsos ou causar distorções. Esse fenômeno é especialmente crítico em áreas densamente povoadas ou complexas, onde a capacidade do SAR em distinguir detalhes individuais é essencial.

A presença de lóbulos laterais contribui para uma degradação global da qualidade das imagens SAR, afetando não apenas a resolução, mas também a nitidez e a precisão. É importante ressaltar que a crítica incidência de lóbulos laterais é observada principalmente em sistemas que utilizam plataformas orbitais. Nesse contexto, este trabalho se concentra de maneira específica na compreensão e na mitigação dos efeitos adversos dos lóbulos laterais na qualidade das imagens SAR orbitais, visando contribuir para a melhoria contínua dessa tecnologia.

1.5 CONTRIBUIÇÕES

Entender como minimizar os lóbulos secundários em radares SAR representa uma contribuição crucial para a melhoria do desempenho e da qualidade das imagens geradas. Essa otimização tem impactos significativos em várias áreas, ampliando a eficácia e a precisão das aplicações dos radares SAR. A minimização dos lóbulos secundários, desempenha um papel fundamental na produção de imagens mais nítidas e com menor interferência. Esse processo, culmina em uma representação mais precisa da superfície, reduzindo artefatos e aprimorando a interpretabilidade das informações capturadas pelo radar. Além disso, essa minimização também desempenha um papel crucial na redução de interferências indesejadas nas imagens produzidas pelos radares SAR. Esse processo resulta em dados mais confiáveis e precisos, especialmente em ambientes desafiadores, como regiões com vegetação densa ou condições meteorológicas adversas. Portanto, a minimização dos lóbulos secundários em radares SAR desempenha um papel fundamental no aprimoramento da qualidade e eficácia desses sistemas, proporcionando benefícios para diversas aplicações que dependem de imagens precisas e confiáveis obtidas por meio desses radares de abertura sintética.

1.6 ESTRUTURA

Este trabalho foi dividido em:

- Introdução: Na introdução foram introduzidos os sistemas SAR, assim como suas configurações e principais parâmetros. Também se apresentaram os principais desafios dos sistemas SAR e em particular a presença dos lóbulos secundários, cuja minimização é o foco do presente trabalho.

- Equacionamento do sistema e processamento de sinal: Neste tópico vai ser abordado o equacionamento utilizado e o processamento de sinal adotado para sínteses das imagens.
- Resultados: Já neste tópico irá ser mostrado os resultados obtidos com a simulação do código em MATLAB.
- Conclusão: E finalmente aqui será mostrado as conclusões que podemos obter do TCC.

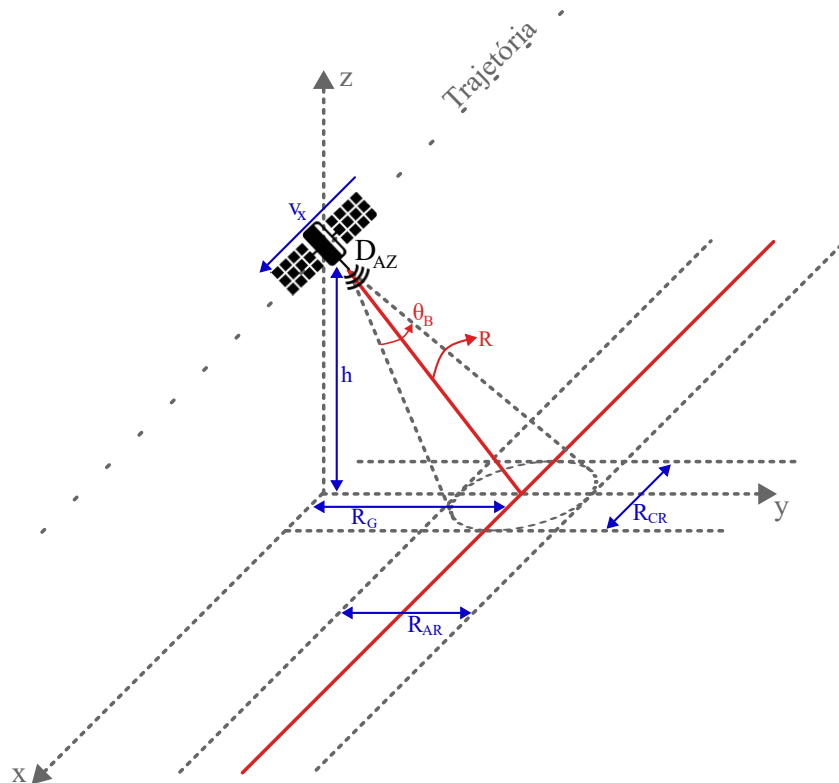
2 EQUACIONAMENTO DO SISTEMA E PROCESSAMENTO DE SINAL

Neste capítulo, serão apresentados os equacionamentos do sistema e o processamento de sinal, ambos necessários para o desenvolvimento e compreensão das simulações. A seção 2.1 apresentará os equacionamentos do sistema, pois para chegar na minimização dos lóbulos secundários é necessário a compreensão do funcionamento de um radar de abertura sintética. Já na seção 2.2, irá ser apresentado o processamento de sinal do sistema, pois é uma parte crucial para obter imagens de alta resolução de uma área.

2.1 EQUACIONAMENTO DO SISTEMA

Para uma melhor compreensão do funcionamento de um SAR, foi realizado uma divisão em subseções, onde as mesmas são 2.1.1. Intervalo cruzado (*Cross-range*), 2.1.2. Frequência de repetição de pulso (*Pulse Repetition Frequency*, PRF) e 2.1.3. A Figura 3 foi criada para ilustrar um radar de plataforma orbital em deslocamento ao longo de uma trajetória durante a varredura do solo. O propósito dessa figura é proporcionar uma representação gráfica dos parâmetros específicos que serão empregados nesta seção:

Figura 3 – Modelo de um SAR.

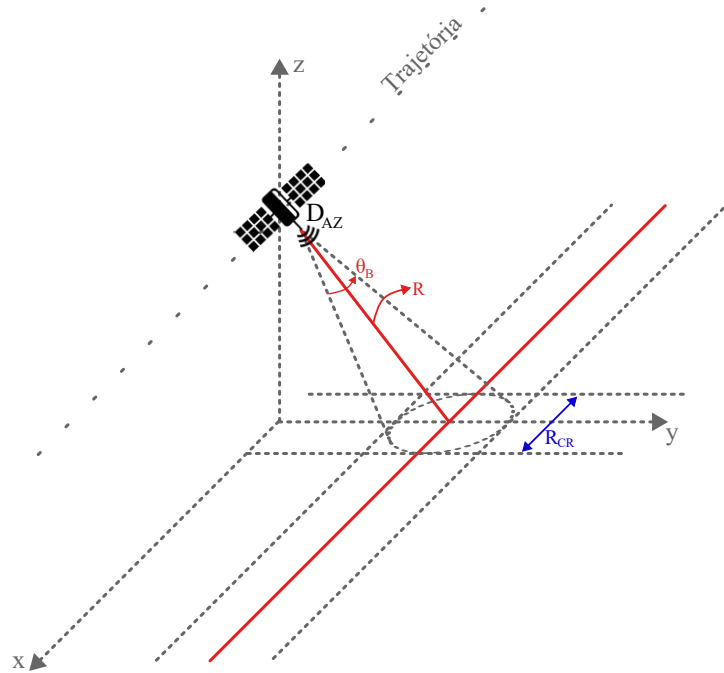


Fonte: Produção do próprio autor.

2.1.1 Intervalo cruzado

O Intervalo Cruzado (*cross-range*), parâmetro fundamental do SAR, desempenha um papel crítico na determinação da distância e da localização de alvos na cena observada [Sullivan 2000]. Para que as imagens SAR sejam interpretadas com precisão, e para que os dados sejam úteis em diversas aplicações, é essencial compreender o processo de equacionamento envolvido. Com o intuito de tornar a compreensão mais eficaz, à Figura 3 foi refeita, mantendo somente os parâmetros que irão ser utilizados, como demonstrado na Figura 4:

Figura 4 – Modelo de um SAR com os parâmetros do intervalo cruzado.



Fonte: Produção do próprio autor.

A resolução do intervalo cruzado δR_{CR} , é uma dimensão importante em um radar SAR, porque se refere à capacidade do radar de detectar e distinguir objetos que estão localizados ao longo de uma direção paralela à trajetória do radar [Skolnik 2000]. Assim a resolução do intervalo cruzado para uma antena de abertura real é dada por:

$$\delta R_{CR} = \theta_B R, \quad (1)$$

Em que R representa a distância inclinada (*slant range*), θ_B é o ângulo de inclinação, que é a relação do comprimento de onda de operação λ , e as dimensões físicas na direção ao longo do azimuth D_{ax} :

$$\theta_B = \frac{\lambda}{D_{ax}}. \quad (2)$$

Assim, substituindo a Equação 2 na Equação 1, tem-se a equação geral da resolução do intervalo cruzado:

$$\delta R_{CR} = \frac{\lambda R}{D_{ax}}. \quad (3)$$

2.1.2 Frequência de repetição de pulso

O PRF do radar, é escolhido para ser maior que a largura de banda Doppler $B_{Doppler}$ por uma constante k_a devido à capacidade de evitar ambiguidades na medição da velocidade radial dos alvos observados. O PRF é a taxa na qual os pulsos de radar são transmitidos. Quando o PRF é insuficientemente alto em comparação com a largura de banda Doppler $B_{Doppler}$, podem ocorrer ambiguidades na medição da velocidade, conhecidas como ambiguidades de Doppler. Isso acontece quando os pulsos transmitidos retornam ao radar antes que o próximo pulso seja transmitido, levando a uma sobreposição de informações.

$$f_p = k_a B_{Doppler}. \quad (4)$$

Geralmente adota-se um valor de k_a superior à 1,5 a fim de compensar a redução do feixe da antena. Ao adotar um k_a mais alto, o radar tem uma margem de segurança adicional para lidar com variações na geometria do feixe da antena e garantir que o PRF seja suficientemente alto para evitar ambiguidades nas medições de velocidade. Isso é crucial quando há variações na velocidade dos alvos ou quando a resolução Doppler precisa ser mantida para uma eficácia consistente do radar. Os valores mínimos efetivos dependerão do padrão de antena real, e dos níveis de *aliasing* permitidos.

A largura de banda Doppler $B_{Doppler}$, é limitada pela largura do feixe da antena

$$B_{Doppler} = \frac{2}{\lambda} v_x \theta_{az}, \quad (5)$$

onde θ_{az} é igual a largura do feixe azimutal da antena (supondo que seja pequena), v_x é a velocidade do satélite na direção x , e λ é o comprimento de onda.

Considerando que a largura do feixe θ_{az} da antena está ligada às suas dimensões físicas D_{ax} , por meio de:

$$\theta_{az} \approx \frac{\lambda}{D_{ax}}. \quad (6)$$

Resulta na expressão geral para o PRF, como:

$$f_p \approx \frac{2k_a v_x}{D_{ax}}. \quad (7)$$

O aspecto interessante desta expressão, é que a PRF do radar depende da relação entre a velocidade e a dimensão da abertura da antena real, mas não da frequência de operação do radar. Portanto, para um tamanho de abertura e velocidade fixos, a PRF é independente da frequência, isso significa que diferentes frequências podem ser utilizadas, mantendo a PRF constante, desde que o tamanho da abertura e a velocidade sejam ajustados adequadamente para atender aos requisitos operacionais e de resolução do sistema SAR.

Observamos que a Equação (6), é uma relação aproximada entre a dimensão da abertura e a largura do feixe. Uma relação mais precisa, dependeria das características reais de iluminação da abertura e provavelmente resultaria em um feixe um pouco mais amplo. No entanto, em aplicações práticas de radares, a relação inversa entre o efeito Doppler e o comprimento de onda é observada, enquanto a largura do feixe da antena tende a ser diretamente proporcional ao comprimento de onda. Isso significa

que o efeito Doppler, relacionado à mudança na frequência do sinal refletido de objetos em movimento, é mais pronunciado com comprimentos de onda menores. Por outro lado, a largura do feixe da antena, responsável por direcionar a energia do radar, aumenta proporcionalmente ao comprimento de onda. Como esses fatores são multiplicados para obter a largura total do espectro Doppler observado no feixe da antena, eles se cancelam de forma a manter a largura total do espectro Doppler constante em relação ao comprimento de onda, permitindo, assim, uma largura de banda Doppler total independente do comprimento de onda, como indicado na Equação (7). [O'Donnell]

2.1.3 Lóbulos secundários

A otimização do PRF em radares é um processo delicado que visa equilibrar dois fatores críticos. Primeiramente, a PRF deve ser ajustada para valores mais baixos, garantindo que as medições de alcance sejam livres de ambiguidades. Isso se relaciona diretamente ao conceito de ambiguidade de alcance, um fenômeno que ocorre quando o intervalo de tempo entre pulsos sucessivos é excessivamente curto, resultando em sobreposição e ambiguidade nas medições de alcance. Quando o sinal refletido de um pulso anterior ainda está em trânsito de volta para o radar durante a transmissão do próximo pulso, surgem desafios na interpretação dos retornos do radar, resultando em medições de alcance imprecisas e ambíguas.

No entanto, a PRF não pode ser reduzida indiscriminadamente. Ela também deve ser suficientemente alta para prevenir o dobramento causado por lóbulos secundários. Lóbulos secundários representam componentes secundários indesejados no diagrama de radiação da antena, podendo resultar em dobramento, comprometendo a precisão das medições. A escolha de uma PRF mais elevada desempenha um papel crucial nesse contexto, proporcionando uma resolução mais fina no domínio angular. Isso minimiza a probabilidade de ocorrência de dobramento causado por lóbulos secundários, especialmente em sistemas de radar que fazem uso de antenas de abertura sintética.

Portanto, a cobertura (tamanho da faixa) e a resolução não podem ser escolhidas independentemente uma da outra.

Para aprimorar a eficácia de radares do SAR e mitigar possíveis desafios associados aos lóbulos secundários, é essencial alinhar o primeiro lóbulo de grade da matriz sintética com a mesma direção angular do primeiro ponto nulo no padrão de elementos da antena real. Ao alinhar estrategicamente esses elementos, evitam-se sobreposições prejudiciais entre lóbulos secundários e pontos nulos, contribuindo para uma direção mais eficiente da energia do radar.

A direção do máximo lóbulo θ_G principal do conjunto sintético é dada por:

$$\theta_G = \frac{\lambda}{2d_E}, \quad (8)$$

sendo d_E o espaçamento entre os elementos do arranjo sintético, no qual pode ser analogamente equiparado ao espaçamento entre elementos em uma antena de arranjo. Essa analogia é relevante para compreender como a disposição dos elementos influencia a formação de imagens e o desempenho geral do sistema. Onde o espaçamento entre os elementos do arranjo sintético d_E depende da velocidade v_x

e a frequência de repetição do pulso f_p segundo:

$$d_E = \frac{v_x}{f_P}. \quad (9)$$

A condição de que PRF f_p é maior ou igual que a relação entre a velocidade e as dimensões físicas, é estabelecida com o propósito de otimizar a confiabilidade e precisão das medições de radar. Essa determinação visa prevenir ambiguidades de alcance, especialmente em contextos dinâmicos, ao mesmo tempo em que garante uma resolução adequada para aquisição de dados:

$$f_P \geq \frac{2v}{D_{ax}} = \frac{v_x}{\delta R_{CR}}, \quad (10)$$

onde δR_{CR} é a resolução do intervalo cruzado.

O primeiro nulo θ_N é igual a largura do feixe azimutal da antena θ_{az} ,

$$\theta_N = \theta_{az} \approx \frac{\lambda}{D_{ax}}. \quad (11)$$

A condição imposta de que o máximo lóbulo θ_G deve ser maior ou igual ao primeiro nulo θ_N é estabelecida para prevenir a ocorrência de lóbulos secundários no padrão de radiação. Essa precaução é crucial para manter a qualidade e a precisão das medições de radar, evitando interferências indesejadas que podem surgir a partir desses lóbulos secundários.

Ao unir essa condição com a capacidade da forma de onda em realizar detecção de alcance sem ambiguidade, conforme expresso na Equação 10, conseguimos:

$$\frac{v_x}{\delta R_{CR}} \leq f_P \leq \frac{c}{2R_U}. \quad (12)$$

A relação entre a velocidade e a resolução do intervalo cruzado, tem que ser menor ou igual ao PRF, que tem que ser menor ou igual que a relação entre a velocidade da luz e o tamanho máximo do *footprint* R_U , no qual, o mesmo representa a área no solo que está sob observação ou influência direta do radar em um determinado momento. Ele é, de certa forma, a projeção espacial das medições ou do feixe do radar no solo. [Skolnik 2001].

Tomando a Equação 12 como base, temos:

$$\frac{R_U}{\delta R_{CR}} \leq \frac{c}{2v_x}. \quad (13)$$

Para padrões de antenas uniformemente iluminados e outras condições ideais, as equações de restrição de PRF se tornam

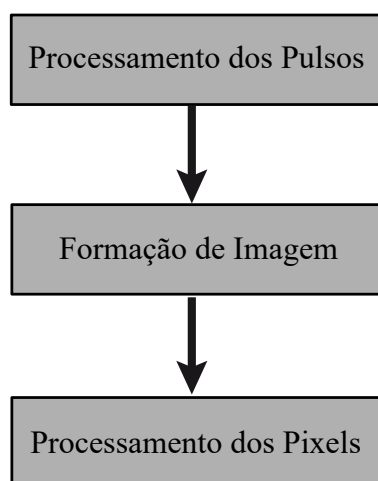
$$1,53 \frac{v_x}{\delta R_{CR}} \leq f_P \leq \frac{c}{3,06R_U} \text{ E } \frac{R_U}{\delta R_{CR}} \leq \frac{c}{4,7v_x}. \quad (14)$$

Basicamente, resultados idênticos são alcançados ao utilizar um peso de iluminação em forma de cosseno [Skolnik 2001].

2.2 PROCESSAMENTO DE SINAL

Abordaremos agora a técnica de processamento de sinal utilizada para obter os resultados apresentados neste trabalho. A [Figura 5](#) demonstra as três etapas básicas do processamento de sinal de um SAR, onde temos o processamento dos pulsos que refere-se à análise e tratamento dos sinais de retorno capturados pelo radar. Isso envolve a aplicação de técnicas para filtrar, corrigir distorções e extrair informações relevantes dos pulsos refletidos. A formação de imagem envolve a síntese e a composição dos dados processados para criar uma representação visual do ambiente ou alvo sob observação. Em um SAR, isso inclui a combinação de informações provenientes de diferentes posições do sensor. Após a formação da imagem, o processamento dos pixels envolve a análise e manipulação das unidades elementares da imagem, conhecidas como pixels. Isso inclui técnicas de filtragem, correção e, muitas vezes, a extração de informações específicas de interesse [\[Curlander 1991\]](#). Mas, para este trabalho foi utilizado somente o diagrama de blocos do processamento dos pulsos.

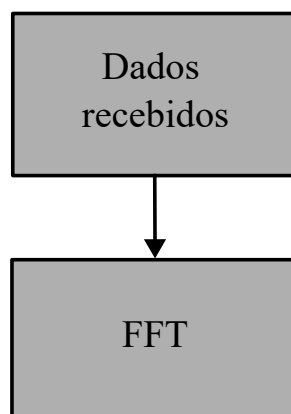
Figura 5 – Etapas básicas de um SAR.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para a análise do processamento dos pulsos, o diagrama de blocos foi dividido em duas partes, a primeira parte está ilustrado na [Figura 6](#)

Figura 6 – Primeira parte do diagrama de blocos do processamento de pulsos.

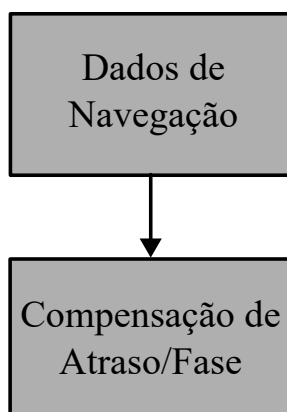


Fonte: Produção do próprio autor.

Na [Figura 6](#), temos os dados não processados e a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT). Os dados não processados, que também são conhecidos como "dados brutos" ou "dados primários", onde representam informações em seu estado mais fundamental, são coletados diretamente de fontes primárias, tais como sensores, sistemas de registro ou observações, sem terem passado por qualquer modificação ou análise substancial. Geralmente caracterizados por sua falta de estruturação, esses dados frequentemente demandam etapas subsequentes de processamento, limpeza e formatação para serem transformados em uma forma utilizável. Já a FFT, é uma técnica matemática que converte um sinal no domínio do tempo em seu equivalente no domínio da frequência. Isso é útil para correção geométrica, onde há um deslocamento causado pela velocidade da plataforma e correção radiométrica, para compensar as variações na resposta do radar devido a condições atmosféricas, topografia e outras influências. Ao aplicar a FFT aos dados brutos, podemos analisar as componentes de frequência do sinal, o que pode revelar padrões, características ou informações ocultas nos dados originais.

Já a [Figura 7](#) representa a segunda parte do diagrama de blocos, onde será tratado sobre os dados de navegação e sobre a compensação de atraso/fase.

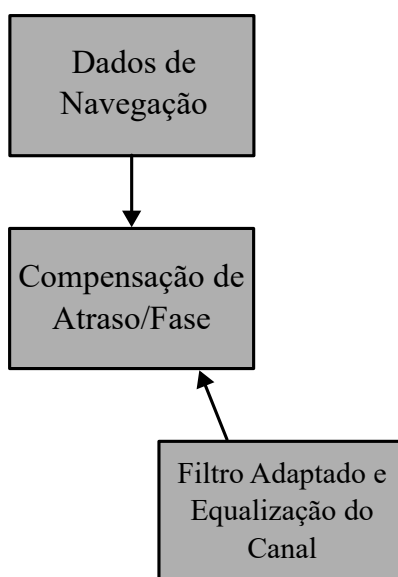
Figura 7 – Segunda parte do diagrama de blocos do processamento de pulsos.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os dados de navegação, oferecem informações detalhadas sobre a posição, altitude, orientação, horário e rota da plataforma que transporta o radar, seja ela uma aeronave ou um satélite. Estes dados, desempenham um papel crucial na asseguuração da exatidão e na correta localização geográfica dos alvos na superfície terrestre, tornando possível a geração de imagens de elevada resolução. Já a compensação de atraso/fase, em um radar SAR desempenha um papel na retificação das variações temporais nos sinais refletidos por diferentes partes de um objeto ou terreno sob observação. Devido às discrepâncias nas distâncias entre o radar e várias regiões do alvo, essas variações podem introduzir distorções na imagem de radar. Portanto, o procedimento de compensação consiste na aplicação de correções de fase para a sincronização, apropriada dos sinais refletidos, assegurando uma representação precisa e com uma georreferenciação adequada da superfície terrestre. Durante a segunda parte, é adicionado um filtro adaptado e é feito a equalização do canal, ilustrado na [Figura 8](#), onde consta que o filtro é projetado para maximizar a relação sinal-ruído, otimizar a detecção de alvos, e a equalização do canal visa corrigir as distorções introduzidas pelo canal de transmissão e recepção do SAR.

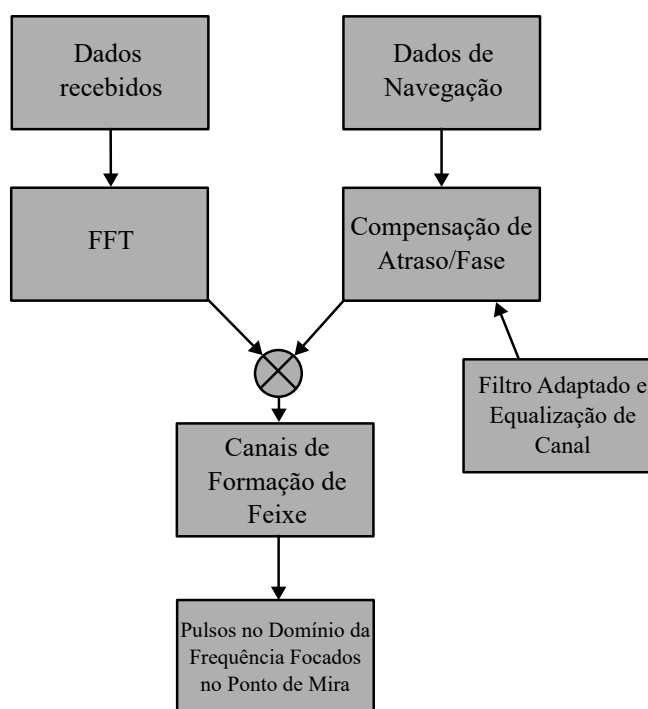
Figura 8 – Filtro adicionado na segunda parte do diagrama de blocos do processamento de pulsos.



Fonte: Produção do próprio autor.

Após isso, é combinado a primeira parte com a segunda, formando a [Figura 9](#), onde temos dois novos blocos, o bloco de canais de formação de feixe e o bloco de pulsos no domínio da frequência focados no ponto de mira.

Figura 9 – Diagrama de blocos do processamento dos pulsos.



Fonte: Produção do próprio autor.

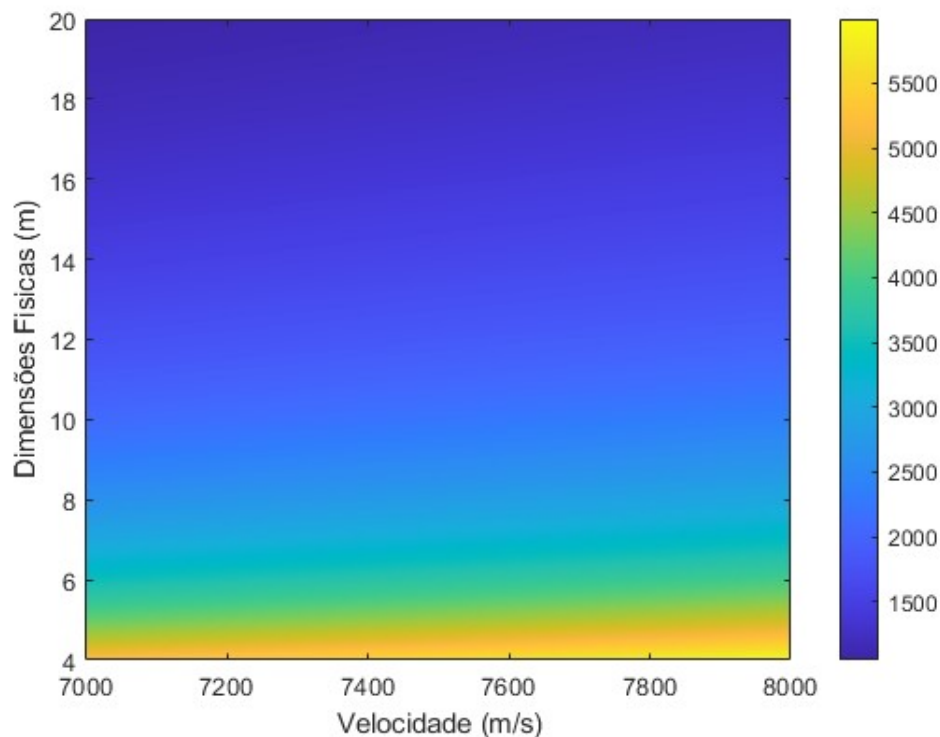
O bloco de canais de formação de feixe, representam elementos críticos para a coleta de dados de radar de múltiplos ângulos de observação. Cada canal está associado a uma direção específica de visada, possibilitando ao SAR a aquisição de informações de diversas perspectivas. Isso resulta em uma melhoria substancial da resolução espacial, e da qualidade da imagem obtida. Durante o estágio de processamento, os dados provenientes de cada canal são sintetizados, permitindo a formação de uma imagem SAR de alta resolução e nitidez. Esse procedimento reduz possíveis erros geométricos e viabiliza uma ampla gama de aplicações. Já o bloco de pulsos no domínio da frequência focados no ponto de mira (FMCW), é uma técnica avançada no campo do SAR que desempenha um papel fundamental na geração de imagens de alta resolução. Essa abordagem, envolve a modulação do sinal de radar em frequência durante a transmissão e subsequente processamento no domínio da frequência. A principal vantagem dos pulsos FMCW é a capacidade de obter resolução em faixa e velocidade, permitindo a detecção de alvos com precisão e a distinção de alvos em movimento. Além disso, a técnica FMCW é menos suscetível a distorções de deslocamento do alvo em comparação com outras abordagens de radar.

3 RESULTADOS

No âmbito deste estudo, foram conduzidas simulações que consideraram um sistema de radar posicionado em LEO. A altitude da órbita escolhida para o radar foi de 2.000 km, com uma largura de banda de 500 MHz, a largura física do radar foi fixada em 4 m e a frequência utilizada foi de 4 e 8 GHz.

O PRF desempenha um papel de extrema importância na análise dos resultados, uma vez que um valor mais elevado de PRF resulta em lóbulos secundários de menor magnitude. Com base nessa informação, a [Figura 10](#) foi desenvolvida considerando as dimensões físicas e a velocidade, onde a tonalidade azul indica uma PRF menor, enquanto a tonalidade amarela indica uma PRF maior. Isso demonstra que a PRF depende exclusivamente das dimensões físicas e da velocidade do radar, evidenciando a relação entre esses parâmetros. Também, foi considerado que a velocidade do radar em órbita LEO varia de 7.000 m/s a 8.000 m/s, com as dimensões físicas, que equivalem ao comprimento na direção do azimute, variando de 4m à 20m e obtendo os valores de PRF variando de $1050s^{-1}$ à $6000s^{-1}$.

Figura 10 – Valores de PRF em termos das dimensões físicas e da velocidade



Fonte: Produção do próprio autor.

A [Figura 10](#), serviu como base para uma nova simulação no Toolbox do MatLab, considerando que o radar estaria operando na banda C. Foram realizadas simulações com a frequência fixada em 4 GHz e 8 GHz, velocidade em 7000 m/s, 7500 m/s e 8000 m/s, altitude fixada em 2000 m, comprimento em 20 m, 12 m e 4 m, largura fixada em 4 m e largura de banda fixada em 500 MHz

Para proporcionar uma compreensão mais abrangente, foram escolhidos 10 resultados e a Tabela 1 foi elaborada para apresentar todos os parâmetros abordados neste trabalho.

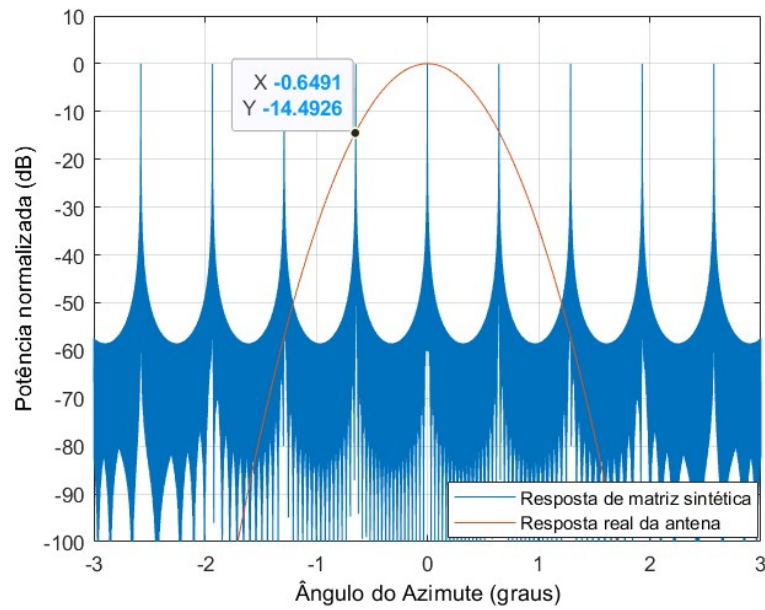
Tabela 1 – Parâmetros das simulações

Simulação	Frequência (GHz)	Velocidade (m/s)	Comprimento (m)
1	4	7000	20
2	4	8000	20
3	4	7500	12
4	4	7000	4
5	4	8000	4
6	8	7000	20
7	8	8000	20
8	8	7500	12
9	8	7000	4
10	8	8000	4

Fonte: Produção do próprio autor.

Desde a simulação 1 até a simulação 5, a frequência permaneceu constante em 4 GHz. Na Figura 11, apresentamos a análise combinada da resposta da matriz sintética e da resposta real da antena em um SAR. Destacamos que a resposta da antena sintética é derivada do produto dessas respostas. Observamos que a presença de lóbulos na matriz sintética ocorre em situações específicas, ou seja, para determinados valores, nos quais a resposta real da antena ainda diminui o suficiente para resultar em lóbulos laterais que são significativos na imagem final gerada pelo SAR. Com um PRF de $1050s^{-1}$, um ganho de 52,53 dB e um nível de lóbulo lateral (*Side lobe level*, SLL) de aproximadamente -14,50 dB. Como resultado, a imagem formada nesta simulação está propensa a apresentar consideráveis ruídos, uma vez que o valor mais desfavorável da Figura 10 foi escolhido para esta configuração.

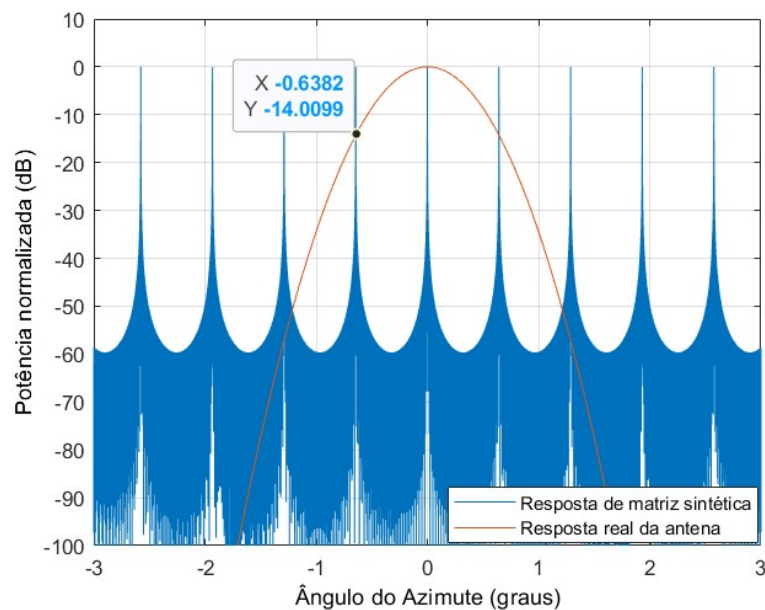
Figura 11 – Simulação 1 - Frequência de 4 GHz, velocidade de 7000 m/s e comprimento de 20 m



Fonte: Produção do próprio autor.

No contexto da [Figura 12](#), foi adotado o cenário mais desfavorável como no caso anterior. Contudo, a única variável modificada foi a velocidade, estabelecida em 8000 m/s. No entanto, é relevante notar que, mesmo sem mudanças perceptíveis, o PRF atingiu o valor de $1200s^{-1}$, enquanto o ganho permaneceu constante em 52,53 dB e o SLL foi de aproximadamente -14,01 dB, logo, a conclusão que se pode tirar dessa simulação é que para manter uma resolução espacial adequada, é necessário ajustar o PRF de acordo com a velocidade da plataforma de radar, ou seja, se a velocidade aumentar, o PRF também deve aumentar para manter a resolução.

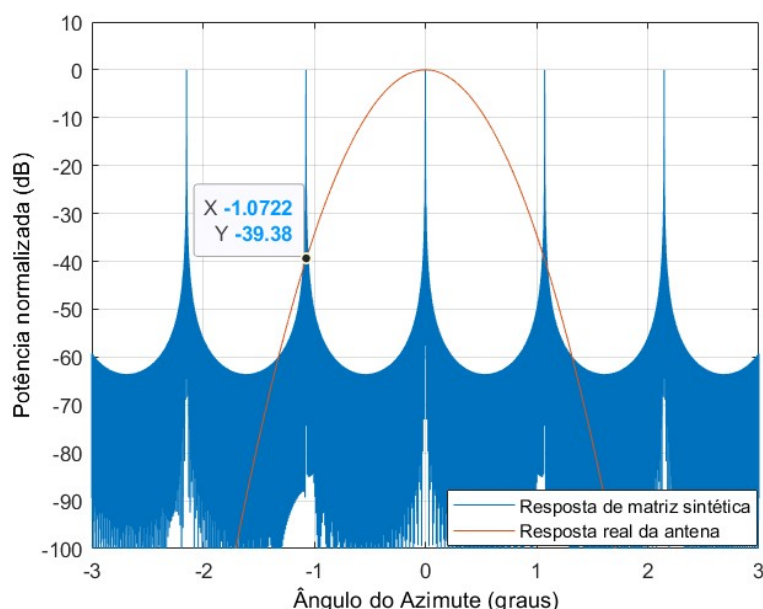
Figura 12 – Simulação 2 - Frequência de 4 GHz, velocidade de 8000 m/s e comprimento de 20 m



Fonte: Produção do próprio autor.

Na simulação 3, os parâmetros foram selecionados com base em um resultado intermediário da [Figura 10](#), com uma velocidade de 7500 m/s e um comprimento de 12 m. Observa-se que, na [Figura 13](#), o resultado se aproxima mais do ideal, visto que os lóbulos secundários diminuíram. Mesmo com alguma interferência, a imagem resultante é mais aceitável. O PRF atingiu $1875s^{-1}$, porém, o ganho diminuiu para 50,31 dB e o SLL para -39,38 dB. Essa configuração, indica um equilíbrio delicado entre a qualidade da imagem e a redução dos lóbulos secundários, destacando a complexidade das escolhas de parâmetros no contexto do radar SAR. A conexão inversa entre o PRF e o ganho frequentemente, ilustra o desafio inerente de conciliar a resolução desejada com as limitações de processamento do sistema. Enquanto um PRF mais elevado proporciona uma resolução mais refinada, essa escolha pode resultar em uma redução no ganho devido às restritas capacidades de processamento do sistema. O equilíbrio delicado entre esses dois elementos, torna-se essencial ao otimizar o desempenho de sistemas de radar para atender às necessidades específicas de aplicação.

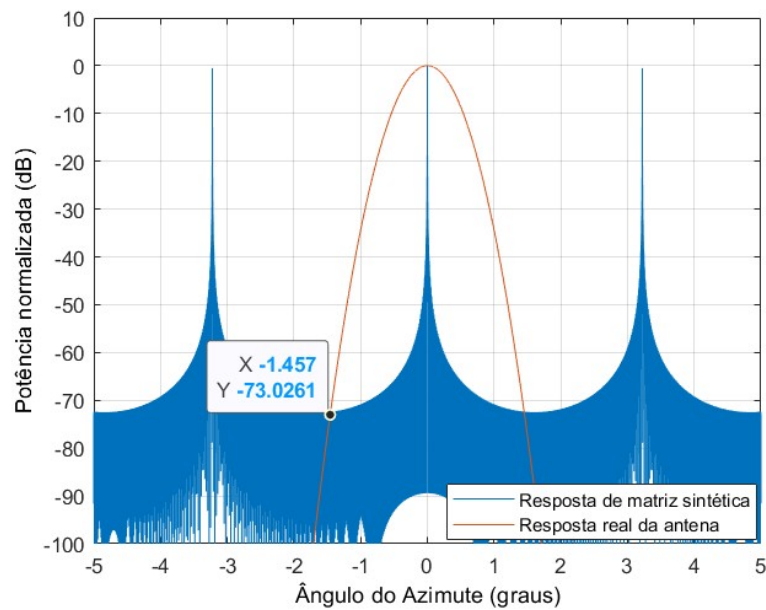
Figura 13 – Simulação 3 - Frequência de 4 GHz, velocidade de 7500 m/s e comprimento de 12 m



Fonte: Produção do próprio autor.

No cenário apresentado na [Figura 14](#), foram empregados os parâmetros otimizados, contudo, a velocidade foi fixada em 7000 m/s. Isso resultou em um desempenho satisfatório, no qual os lóbulos secundários não exercem impacto significativo na resposta real da antena. No entanto, apesar desse resultado positivo, ainda não alcançamos a condição ideal. A configuração resultou em um PRF de $5250s^{-1}$, enquanto o ganho continuou a diminuir, atingindo 45,54 dB e o SLL para aproximadamente -73,03 dB.

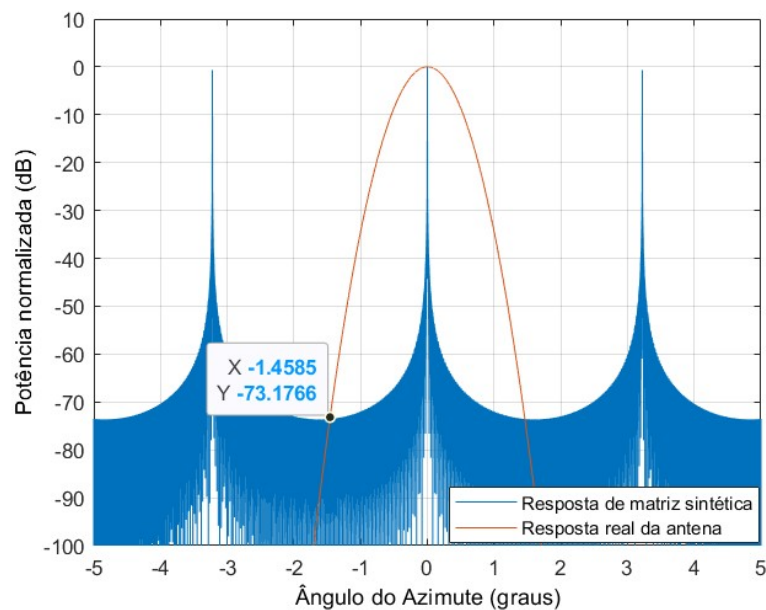
Figura 14 – Simulação 4 - Frequência de 4 GHz, velocidade de 7000 m/s e comprimento de 4 m



Fonte: Produção do próprio autor.

A [Figura 15](#), representa o cenário mais otimizado alcançado para a minimização dos lóbulos secundários, caracterizado pela ausência de interferências na resposta real da antena. Nesse contexto, o ganho permanece inalterado em 45,54 dB, já o SLL foi de aproximadamente -73,18 dB, enquanto o PRF aumentou para $6000s^{-1}$. Este resultado, foi obtido através do incremento da velocidade para 8000 m/s, além da redução da potência normalizada de -60 dB para -70 dB, destacando a importância crítica do controle preciso da velocidade na otimização do desempenho do sistema, refletindo uma abordagem eficaz para mitigar lóbulos secundários em aplicações de radar.

Figura 15 – Simulação 5 - Frequência de 4 GHz, velocidade de 8000 m/s e comprimento de 4 m

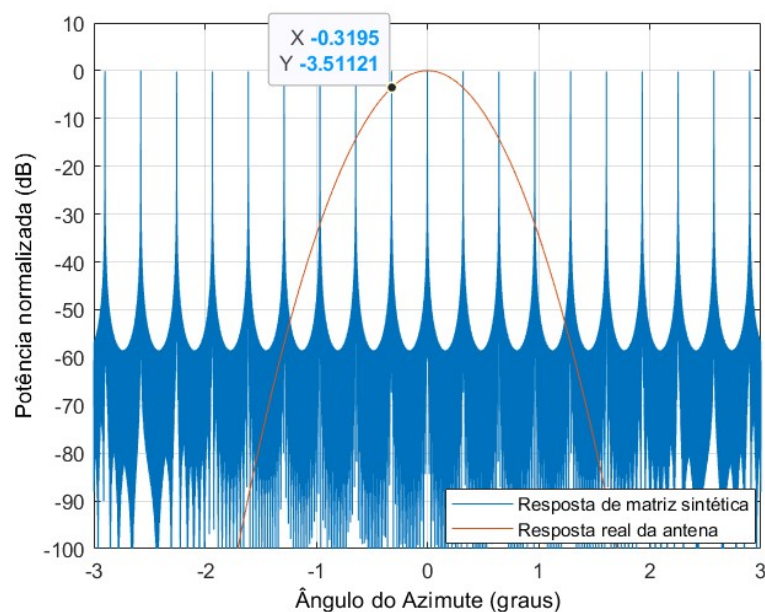


Fonte: Produção do próprio autor.

Nas simulações 6 até 10, a frequência foi mantida constante em 8 GHz.

Na [Figura 16](#), a velocidade foi fixada em 7000 m/s, e os parâmetros foram ajustados para representar o pior cenário possível. Uma significativa interferência dos lóbulos secundários, na resposta real da antenna foi observada, caracterizando essa simulação como o pior caso entre todas. Importante notar que o único parâmetro alterado em relação à [Figura 11](#), foi a frequência, que permaneceu constante. O PRF permaneceu em $1050s^{-1}$, mas devido ao aumento da frequência, houve um aumento no ganho, alcançando 58,55 dB, e o SLL para aproximadamente -3,51 dB. Este cenário, destaca a sensibilidade do sistema às mudanças na frequência, evidenciando o impacto direto na resposta da antenna e na qualidade global da imagem formada durante o processo de radar SAR.

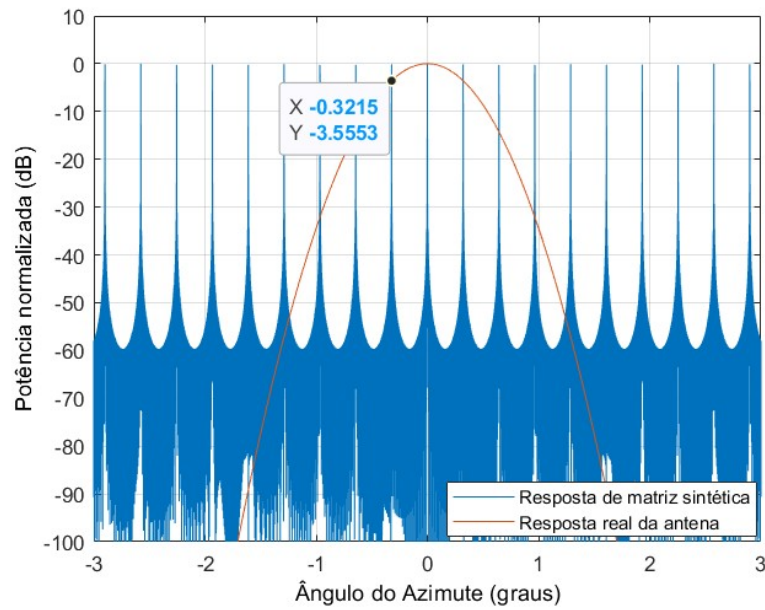
Figura 16 – Simulação 6 - Frequência de 8 GHz, velocidade de 7000 m/s e comprimento de 20 m



Fonte: Produção do próprio autor.

Na [Figura 17](#), as interferências persistiram, reproduzindo o cenário observado no pior caso anterior ([Figura 16](#)). A única modificação realizada entre esses dois casos foi o aumento da velocidade para 8000 m/s, resultando em um PRF de $1200s^{-1}$. O ganho, nesse contexto, permaneceu constante em 58,55 dB e o SLL foi de aproximadamente -3,56 dB. Este caso ilustra uma situação na qual, apesar da manutenção de um bom ganho, as interferências permanecem inaceitáveis.

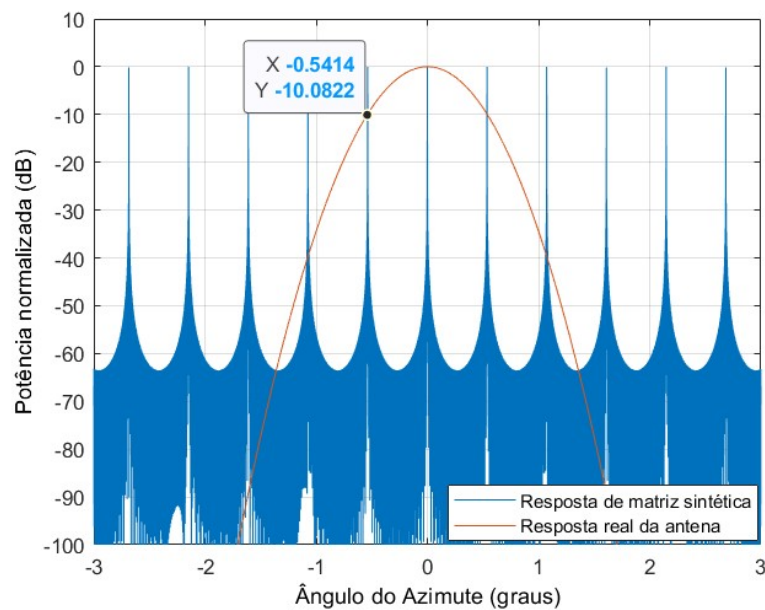
Figura 17 – Simulação 7 - Frequência de 8 GHz, velocidade de 8000 m/s e comprimento de 20 m



Fonte: Produção do próprio autor.

No contexto da [Figura 18](#), foram empregados parâmetros intermediários, com a única alteração sendo a velocidade fixada em 7500 m/s. No entanto, os resultados ainda não foram satisfatórios, uma vez que os lóbulos secundários continuaram a afetar significativamente a resposta real da antena. Nesta simulação, o PRF atingiu $1875s^{-1}$, enquanto o ganho registrou um valor de 56,33 dB e o SLL de aproximadamente -10,08 dB. Conforme previsto, houve uma diminuição no ganho e no SLL em comparação com a simulação anterior.

Figura 18 – Simulação 8 - Frequência de 8 GHz, velocidade de 7500 m/s e comprimento de 12 m

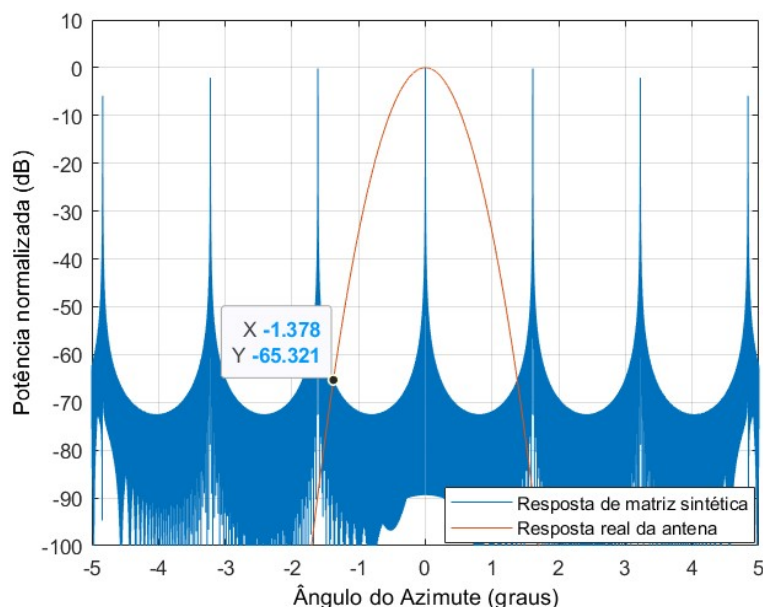


Fonte: Produção do próprio autor.

No cenário representado pela [Figura 19](#), obteve-se um resultado positivo ao empregar parâmetros

otimizados, associados a uma velocidade de 7000 m/s. Embora ainda não tenha atingido a condição ideal, essa simulação se destacou como a mais próxima desse ideal. Os parâmetros incluíram uma potência normalizada de -70 dB, um PRF de $5250s^{-1}$, um ganho de 51,56 dB e um SLL de aproximadamente -65,32 dB. É relevante observar que esse ganho se aproximou consideravelmente do melhor ganho obtido nas simulações com 4 GHz.

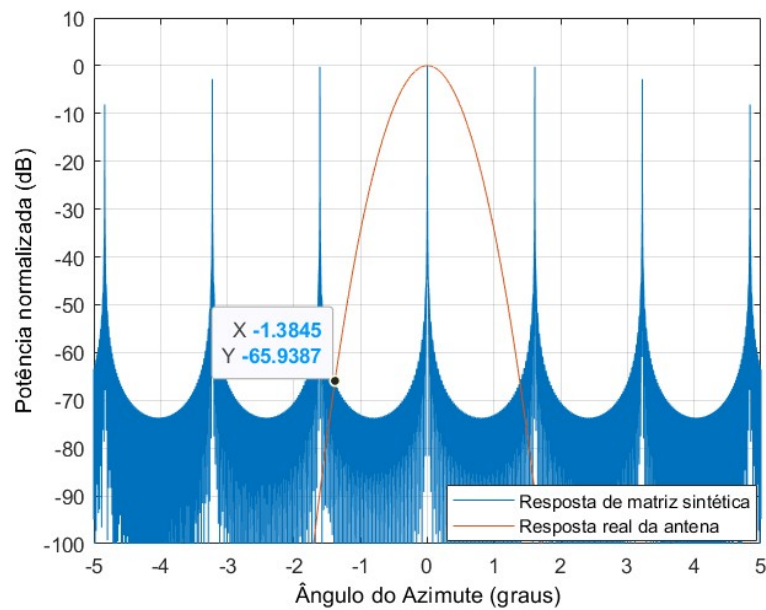
Figura 19 – Simulação 9 - Frequência de 8 GHz, velocidade de 7000 m/s e comprimento de 4 m



Fonte: Produção do próprio autor.

Na [Figura 20](#), alcançamos o resultado mais otimizado entre todas as simulações, utilizando os melhores parâmetros. A velocidade foi fixada em 8000 m/s, resultando em um ganho de 51,56 dB, um SLL de aproximadamente -65,94 dB e um PRF de $6000s^{-1}$. Esta simulação destacou-se como a mais bem-sucedida, uma vez que os lóbulos secundários não exerceram efeito significativo na resposta real da antena. Como resultado, espera-se obter uma qualidade de imagem notavelmente alta, praticamente livre de ruídos, e com um ganho elevado, proporcionando um desempenho excepcional no contexto do radar SAR.

Figura 20 – Simulação 10 - Frequência de 8 GHz, velocidade de 8000 m/s e comprimento de 4 m



Fonte: Produção do próprio autor.

Após analisar todas as simulações, fica evidente que para alcançar uma redução nos lóbulos secundários, é necessário aumentar o PRF. No entanto, essa abordagem impacta negativamente no ganho dos resultados. Além disso, para obter um PRF mais elevado, a escolha de uma velocidade mais alta, combinada com um comprimento e largura menores, parece ser a opção mais eficaz.

A frequência, em particular, requer uma escolha criteriosa, dependendo das dimensões específicas do radar. Para radares de maiores dimensões, optar por uma frequência menor é mais favorável, enquanto para radares menores, escolher uma frequência mais alta é mais apropriado. Essas considerações destacam a complexidade na otimização de parâmetros em sistemas de radar SAR, onde o ajuste de uma variável pode ter implicações diretas em outras, exigindo uma abordagem equilibrada para atender aos requisitos específicos de cada aplicação. A Tabela 2 apresenta todos os parâmetros juntamente com os valores resultantes das simulações, incluindo o ganho, SLL e a PRF.

Tabela 2 – Parâmetros e valores obtidos das simulações

Simulação	Frequencia (GHz)	Velocidade (m/s)	Comprimento (m)	Ganho Teórico (dB)	SLL (dB)	PRF
1	4	7000	20	52,53	-14,19	1050
2	4	8000	20	52,53	-14,01	1200
3	4	7500	12	50,31	-39,38	1875
4	4	7000	4	45,54	-73,03	5250
5	4	8000	4	45,54	-73,18	6000
6	8	7000	20	58,55	-3,51	1050
7	8	8000	20	58,55	-3,56	1200
8	8	7500	12	56,33	-10,08	1875
9	8	7000	4	51,56	-65,32	5250
10	8	8000	4	51,56	-65,94	6000

Fonte: Produção do próprio autor.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho, proporcionou uma análise a respeito da minimização da intensidade dos lóbulos secundários em sistemas SAR, fundamentando-se nos códigos disponíveis na Toolbox do MATLAB. Para alcançar esse propósito, foram apresentados conceitos essenciais sobre radares de abertura sintética, estabelecendo uma compreensão abrangente das técnicas empregadas. Entre esses conceitos, foram abordados temas como o PRF, parâmetros relevantes e outros aspectos que foram explanados ao longo de todo o trabalho.

Além disso, abordou o equacionamento do sistema, revelando que a configuração ideal para a minimização dos lóbulos secundários, envolve posicionar o primeiro lóbulo de grade na matriz sintética, no mesmo local que o primeiro ponto nulo no padrão de elementos da antena real. No entanto, as simulações realizadas não foram capazes de atingir esse cenário ideal, conseguindo apenas se aproximar desse objetivo. Esse resultado, destaca os desafios práticos e as limitações na busca pela configuração ideal, ressaltando a importância de uma abordagem cuidadosa na otimização de sistemas de radares de abertura sintética. De todas formas, mesmo não atingindo o caso ideal, as simulações mostraram que possível reduzir o SLL a valores compatíveis com muitas aplicações.

Foi possível observar também, que tudo irá depender das dimensões dos radares, pois para radares de maiores dimensões, é melhor se optar por uma frequência menor, enquanto que para radares de menores dimensões, é melhor se optar por frequências maiores. Devido as simulações que foram apresentadas, os melhores resultados para radares maiores, foi com a frequência baixa, enquanto que para radares de menor dimensão foi com a frequência alta.

A observação fundamental deste estudo, é que a escolha adequada da frequência está intrinsecamente ligada às dimensões dos radares. Para radares de maiores dimensões, a opção por uma frequência menor demonstrou ser mais eficaz, conforme evidenciado pelas simulações apresentadas. Em contrapartida, para radares de menores dimensões, optar por frequências mais elevadas produziu os melhores resultados. Essa conclusão, ressalta a influência significativa das dimensões do radar na seleção da frequência ideal para a minimização dos lóbulos secundários.

É relevante destacar, que há uma relação inversa entre o PRF e o ganho, conforme observado nas simulações. Quanto maior o PRF, menor é o ganho registrado nos resultados. Essa consideração, sublinha a importância de encontrar um equilíbrio cuidadoso entre o PRF desejado para a resolução temporal e as limitações no ganho do sistema. Uma observação relevante é que a velocidade tem um impacto direto no PRF. Outro aspecto crucial a ser destacado é que velocidade da plataforma de radar influenciarão o PRF, conforme evidenciado nas simulações apresentadas. Essa relação destaca a necessidade de considerar cuidadosamente a velocidade como um parâmetro chave ao otimizar o desempenho do sistema, pois ela desempenha um papel crucial na determinação do intervalo de tempo entre pulsos sucessivos e, portanto, afeta diretamente o PRF.

Certamente, uma continuação deste trabalho poderia se concentrar nas simulações que exploram a formação de imagem após a minimização dos lóbulos secundários. Essa extensão, permitiria uma análise mais aprofundada sobre como as otimizações realizadas nos parâmetros afetam diretamente a

qualidade da imagem resultante. Além disso, considerar o impacto dessas modificações na resolução e na precisão das imagens geradas, proporcionaria *insights* valiosos para aprimorar ainda mais a eficiência dos sistemas de radares de abertura sintética. Essa abordagem, contribuiria significativamente para a compreensão prática das implicações das otimizações propostas no contexto da formação de imagem.

REFERÊNCIAS

- CURLANDER, R. N. M. J. C. **Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing**. [S.l.]: Wiley, 1991.
- FALQUETO, L. E. A importância de dados polarimétricos para detecção de alvos artificiais no mar utilizando imagens sar. **Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)**, n. 5, 2018.
- FURRY, A. C. Redução de ruído em imagens sar pelo uso de filtros robustos. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, n. 10, 1995.
- O'DONNELL, D. R. M. **Radar Systems Engineering Lecture 18 Synthetic Aperture Radar (SAR)**. New Hampshire: IEEE.
- SKOLNIK, M. **Radar Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2000.
- SKOLNIK, M. **Introduction to Radar Systems**. New York: McGraw-Hill, 2001.
- SULLIVAN, R. J. **Radar Foundations for Imaging and Advanced Concepts**. Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2000.
- WEHNER, D. R. **High-Resolution Radar**. Boston: Artech House, 1994.

ANEXO A – TOOLBOX DO MATLAB

```

clear all
close all
clc

% Definindo os parametros:

% Configuração da plataforma
v = 8000; % Velocidade (m/s)
h = 2000e3; % Altitude (m)

% Configurações do sinal do radar
freq = 8e9; % Frequencia do radar (Hz)
lambda = freq2wavelen(freq); % Comprimento de onda (m)
bw = 500e6; % Largura de banda (Hz)
proctime = 0.8; % Tempo de processamento (s)

%Configuração da antena, podendo alterar o Ganho e a largura do feixe

% Dimensão da antena
daz = 4; % Ao longo do azimuth (m)
del = 4; % Ao longo da altura (m)

realAntBeamwidth = ap2beamwidth([daz del],lambda) % [Az El] (deg)

antGain = aperture2gain(daz*del, lambda) % dBi

%Depression angle (angulo de depressão) é usado para definir a direção da
%antena
depang_flat = (45:85)';
grazang_flat = depang_flat;
losrng = h./sind(depang_flat); % Alcance da linha de visão (m)

Rearth = physconst('earthradius');
depang_sph = depressionang(h,losrng,'Curved',Rearth);
grazang_sph = grazingang(h,losrng,'Curved',Rearth);

tgtHeight = 0;

```

```

NS = 313;           % Atmosfera de referência N-Unidades
Re = effearthradius(min(losrng),h,tgtHeight,'SurfaceRefractivity',NS);
%Raio efetivo da Terra (m)
Re/Rearth

depang = depang_sph(24)

grazang = grazang_sph(24)

slantrng = losrng(24)

%%FOOTPRINT é determinada pela faixa ao longo do alcance
%%(ou distância percorrida na direção ao longo do alcance)
%%e pela faixa transversal (ou distância percorrida na direção
%%transversal).

[rangeswath, crngswath] = aperture2swath(slantrng,lambda,
[del daz],grazang);
['Real antenna range footprint: ',
num2str(round(engunits(rangeswath),1)), ' km']

['Real antenna cross range footprint: ',
num2str(round(engunits(crngswath),1)), ' km']

%Levando em consideração a curvatura da Terra
distgrndtrack = Re*deg2rad(depang-grazang);
['Distance from nadir to center of the footprint: ',
num2str(round(engunits(distgrndtrack),1)), ' km']

%Aumentar a frequência de operação do radar reduz o footprint da antena.

f = [freq/2 3/4*freq freq 4/3*freq]';
% Frequências operacionais (Hz) dentro da banda C
lambdav = freq2wavelen(f);
% Comprimentos de onda (m)
[rangeswathv,crngswathv] = aperture2swath(slantrng,lambdav,
[del daz],grazang);
clf;
plotAntennaFootprintVsFreq(freq,f,rangeswathv,crngswathv);

```

```

%Footprint do feixe e a distância do centro do feixe ao nadir
%%diminuem quando o Grazing angles aumenta.

grazv = grazang_sph(8:8:end);           % Ângulos de pastagem (graus)
depangv = depang_sph(8:8:end);
slantrngv = losrng(8:8:end);           % Alcance inclinado até o chão
rangeswathv = zeros(1,numel(grazv));
crngswathv = zeros(1,numel(grazv));

distgrndtrackv = Re*deg2rad(depangv-grazv);
for i=1:numel(grazv)
    [rangeswathv(i),crngswathv(i)] =
        aperture2swath(slantrngv(i),lambda,[del_daz],grazv(i));
end
clf;
plotAntennaFootprintVsGrazAng(grazv,distgrndtrackv,rangeswathv,
    crngswathv,grazang);

slantrngres = bw2rangeres(bw)

rngres = slant2grndrangeres(slantrngres,grazang);
disp(['Real antenna ground range resolution: ',
    num2str(round(rngres,2)), ' m'])

crngres = crngswath;
disp(['Real antenna cross-range resolution: ',
    num2str(round(engunits(crngres),1)), ' km'])

%Largura da Banda
bwv = [100e6 200e6 500e6 1e9]; % Largura de banda de sinal

rngresv = zeros(numel(grazang_sph),numel(bwv));
for j=1:numel(grazang_sph)
    slantrngresv = bw2rangeres(bwv);
    rngresv(j,:) = slant2grndrangeres(slantrngresv,grazang_sph(j));
end

idealSyntheticApertureLength = sarlen(slantrng,lambda,daz);
% Comprimento de abertura sintética (m)
azResolution = sarazres(lambda,slantrng,idealSyntheticApertureLength);

```

```

% Resolução de alcance cruzado (azimute) (m)
integrationTime = sarinttime(idealSyntheticApertureLength,v);
% Tempo(s) ideal(is) de integração

Parameters = ["Synthetic Aperture Length";
"Range Resolution";"Cross Range Resolution";"Integration Time"];
IdealSAR = [round(idealSyntheticApertureLength/1e3,1);
rngres;round(azResolution,1);round(integrationTime*1e3,1)];
Units = ["km";"m";"m";"ms"];
idealSAR = table(Parameters,IdealSAR,Units)

effSyntheticApertureLength = sarlen(v,proctime);
% Leve em consideração a restrição de tempo de processamento
effAzResolution = sarazres(lambda,slantrng,effSyntheticApertureLength);
% Resolução efetiva de azimute (m)

RealAntenna = [NaN; rngres; round(crngres); NaN];
EffectiveSAR = [round(effSyntheticApertureLength/1e3,1);rngres;
round(effAzResolution,1);round(proctime*1e3,1)];

sar = table(Parameters,RealAntenna,IdealSAR,EffectiveSAR,Units)

desiredCRngRes = (0.5:0.2:5);      %m
desiredRngCov = (16e3:5e3:100e3); %m
[prfminv, prfmaxv] = sarprfbounds(v,desiredCRngRes,desiredRngCov,grazang);
clf
plotPRFbounds(prfminv,desiredCRngRes,prfmaxv,desiredRngCov);

%%a função sarprf para calcular a PRF do radar com base
%%na velocidade do satélite e nas dimensões reais da antena
%%ao longo do azimute.
prf = sarprf(v,daz,'RollOff',1.5)

t = 1/prf;
distpri = sarlen(v,t) %Distancia percorrida pelo satellite em um PRI

sarArray = phased.ULA('NumElements',
ceil(effSyntheticApertureLength/distpri)
+1,'ElementSpacing',distpri);
distpri/lambda

```

```

realAnt = phased.CosineAntennaElement('FrequencyRange',
[freq-bw/2 freq+bw/2],'CosinePower',26e3);
realAntBeamwidth(1)

b = beamwidth(realAnt,freq)

figure()
plotResponse(sarArray,freq,physconst('LightSpeed'),'RespCut',
'Az','AzimuthAngles',(-3:0.001:3));
hold on
plotResponse(realAnt,freq,'RespCut','Az','AzimuthAngles',
(-3:0.001:3));
hold off
legend('Resposta de matriz sintética',
'Resposta real da antena','Location','northwest')
xlabel('Ângulo do Azimute (graus)')
ylabel('Potência normalizada (dB)')
title()
% Anotações
xl.LabelVerticalAlignment = 'top';
xl.LabelHorizontalAlignment = 'left';

```