

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE CPIO EM ENGENHARIA AEROESPACIAL

Érica Rostirolla  
Gustavo Marques  
José Zanon e  
Leonardo de Souza

**DESCRIÇÃO DETALHADA DE UM PROJETO DE RADAR DE  
ABERTURA SINTÉTICA**

Santa Maria, RS  
2019

**Érica Rostirolla  
Gustavo Marques  
José Zanon e  
Leonardo de Souza**

## **DESCRIÇÃO DETALHADA DE UM PROJETO DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA**

Trabalho Final de Graduação apresentado ao Curso de CPIO em Engenharia Aeroespacial, Área de Concentração em Sensoriamento Remoto, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Graduados em Engenharia Aeroespacial**.

ORIENTADOR: Prof. Manoel de Araújo Sousa Júnior

Santa Maria, RS  
2019

**Érica Rostirolla  
Gustavo Marques  
José Zanon e  
Leonardo de Souza**

## **DESCRIÇÃO DETALHADA DE UM PROJETO DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA**

Trabalho Final de Graduação apresentado ao Curso de CPIO em Engenharia Aeroespacial, Área de Concentração em Sensoriamento Remoto, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Graduados em Engenharia Aeroespacial**.

**Aprovado em 13 de dezembro de 2019:**

Santa Maria, RS  
2019

## RESUMO

### DESCRIÇÃO DETALHADA DE UM PROJETO DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA

AUTOR: Érica Rostirolla  
Gustavo Marques  
José Zanon e  
Leonardo de Souza

ORIENTADOR: Manoel de Araújo Sousa Júnior

Este trabalho é um estudo sobre o projeto de um radar de abertura sintética. No princípio, foi realizada uma análise sobre um SAR genérico, com o intuito de esclarecer o funcionamento do mesmo, através das leituras dos livros Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto e Radar Handbook, e da página na Internet da Agência Espacial Europeia. Neste processo, foram detalhados o sistema de emissão e recepção de ondas, o seu algoritmo e interferometria; e definidos os conceitos de slant range, ground range, amplitude de onda e ângulo de fase. Após, foi descrito um projeto de um SAR produzido por uma turma de estudantes do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), para exemplificar nosso trabalho. Nesta seção, foram discriminados seus componentes, diagrama de bloco, desenho da antena, módulo de radiofrequência, sistema de alimentação, processo de fabricação (apresentando o custo teórico e a montagem), além do seu código no MATLAB. Por fim, foi realizada uma pesquisa a qual tinha como intuito a exemplificação de radares que utilizam do sensoriamento de um SAR como função principal.

**Palavras-chave:** Radar. SAR. Radar de Abertura Sintética. (...)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>CONCEITOS E VISÃO GERAL DO SAR</b> .....	<b>8</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	8
4.2	EMISSÃO E RECEPÇÃO DAS ONDAS .....	9
<b>4.2.1</b>	<b>Slant Range e Ground Range</b> .....	<b>11</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Amplitude e Fase</b> .....	<b>12</b>
4.3	INTERFEROMETRIA .....	12
4.4	ALGORITMO SAR .....	13
<b>5</b>	<b>DESCRIÇÃO DO PROJETO DE UM RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA</b> .....	<b>16</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	16
5.2	COMPONENTES .....	17
5.3	DIAGRAMA DE BLOCO .....	18
5.4	DESENHO DA ANTENA .....	20
5.5	MÓDULO RF .....	21
5.6	ALIMENTAÇÃO .....	21
5.7	TABELA DE PREÇOS .....	22
5.8	FABRICAÇÃO .....	25
<b>5.8.1</b>	<b>Antena</b> .....	<b>25</b>
<b>5.8.2</b>	<b>Montagem</b> .....	<b>25</b>
5.9	CÓDIGO MATLAB .....	31
<b>5.9.1</b>	<b>Doppler vs tempo</b> .....	<b>31</b>
<b>5.9.2</b>	<b>Imagem SAR</b> .....	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>PRINCIPAIS RADARES DE ABERTURA SINTÉTICA</b> .....	<b>33</b>
6.1	RADARSAT-1 .....	33
<b>6.1.1</b>	<b>Características</b> .....	<b>33</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Funcionamento</b> .....	<b>34</b>
6.2	ALOS PALSAR .....	36
<b>6.2.1</b>	<b>Características</b> .....	<b>36</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Funcionamento</b> .....	<b>37</b>
6.3	TERRASAR-X .....	38
<b>6.3.1</b>	<b>Características</b> .....	<b>38</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Funcionamento</b> .....	<b>39</b>
6.4	SENTINEL 1 .....	40
<b>6.4.1</b>	<b>Características</b> .....	<b>40</b>
<b>6.4.2</b>	<b>Funcionamento</b> .....	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>43</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sensores remotos ativos, como os radares, sempre foi tido como um grande desafio para os pesquisadores desta área por envolver muita competência por parte de engenheiros das áreas de: elétrica, eletrônica, mecânica, aeroespacial, computação, física e matemática.

No início da década de 50 começou o desenvolvimento do que hoje conhecemos como radares de abertura sintética ou SAR. Um pouco antes, durante a primeira e segunda guerra mundial, as potências buscavam mecanismos para detectar a aproximação de barcos ou aviões inimigos. com base nos estudos e experimentos do telemobiloscópio confeccionado pelo alemão Christian Hülsmeier e de resultados clássicos a respeito da radiação eletromagnética. O britânico Watston-Watt desenvolveu uma tecnologia capaz de detectar aeronaves a longas distâncias, utilizando um sistema de telemetria fixa e rotatória. Dessa maneira, a Inglaterra implementou este sistema de defesa, sendo considerado o primeiro radar funcional.(Encyclopedia Britannica, 2019)

Com o contínuo desenvolvimento dessa tecnologia o radar passou a ser utilizado amplamente em larga escala em aplicações civis, que o modificou de acordo com seus interesses. A partir disso, deu-se o desenvolvimento do radar de abertura sintética (SAR), cujo conceito original foi descrito pelo engenheiro americano Carl Wiley no ano de 1951 e aprimorado nos anos seguintes por meio de um estudo denominado Projeto Michigan, feito pela Universidade de Illinois.(SKOLNIK, 2008)

Portanto, é de suma importância compreender que o radar de abertura sintética destaca-se como uma ferramenta indispensável na sociedade atual, visto sua ampla gama de aplicações relacionadas à sua capacidade de imageamento, destacando as aplicações para desastres naturais, monitoramento de rotas marítimas, agricultura, geologia, movimentos de massas, vulcanismos, etc.

Neste trabalho é apresentado o resultado de um estudo feito sobre por uma equipe de três alunos que construíram um radar e conduziram uma sequência de experimentos à medida que o kit de radar fosse sendo implementado, para conferir mais dedicação e aperfeiçoamento, o projeto foi tratado como modo de competição, sendo a equipe vencedora aquela que, no final, apresentou a melhor imagem SAR de uma cena alvo de sua escolha dentro do campus do MIT; a imagem mais detalhada e criativa ficou com o prêmio. Ademais, foram utilizadas bibliografias distintas e especializadas a fim de nortear e aprimorar o projeto realizado como, por exemplo, o artigo acadêmico J.D. Kraus, Antennas, 2nd Ed, McGraw Hill, 1988, que atribui conceitos a respeito de antenas, dentre outras bibliografias como Skolnik. M., Radar Handbook (SKOLNIK, 2008), MIT Radiation Laboratory Series, etc.

## 2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

O objetivo geral deste trabalho é analisar e descrever em detalhe a concepção de um radar de abertura sintética (SAR), usando a especificação e o conceito detalhado no projeto desenvolvido pelo MIT (Charvat, Gregory et al., 2011).

Como objetivos específicos temos:

- Descrição teórica do que é um radar de abertura sintética (SAR).
- Descrição dos principais componentes que compõem um sistema SAR e apresentar o diagrama de montagem, descrevendo como cada item funciona.
- Apresentar a montagem do sistema e exemplos das imagens geradas.
- Apresentação dos principais sistemas SAR orbitais em uso atualmente.

Justificativa deste trabalho é, a longo prazo, utilizar esse conceito para a construção física de um exemplar, com a finalidade de estudar, de forma prática, os possíveis resultados que este material pode nos fornecer.

A escolha da abordagem sobre radares de abertura sintética (SAR), pode ser justificada pela sua aplicação. Esta que pode ser exemplificada como o imageamento de determinadas áreas com melhor precisão que demais modelos de radares. E, também, devido a alta tecnologia que está intrinsecamente ligada em seu funcionamento como, por exemplo, simular uma grande antena dentro de uma pequena antena, para que o radar cumpra seus objetivos em órbita.

Outra justificativa está vinculado ao número de docentes especializados nessa área e, também, ao nível de facilidade de acesso de materiais, o que contribui diretamente no avanço dos estudos desses tipos de radares. Ademais, cabe uma breve descrição, exemplificando os principais radares de abertura sintética que já estiveram ou estão em órbita, explicitando seus modo de funcionamento, características e aplicações.

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho é um estudo feito sobre o projeto já realizado pelos estudantes do MIT. Nesse sentido, o método de abordagem utilizado foi de uma releitura de como uma montagem de equipes com 3 pessoas construíram um radar e conduziram uma sequência de experimentos à medida que o kit de radar fosse sendo implementado, para conferir mais dedicação e aperfeiçoamento, o projeto foi tratado como modelo de competição, sendo a equipe vencedora aquela que, no final, apresentou a melhor imagem SAR de uma cena alvo de sua escolha dentro do campus; a imagem mais detalhada e criativa. Ademais, foram utilizadas bibliografias distintas e especializadas afim de nortear e aprimorar o projeto realizado como, por exemplo, o artigo acadêmico J.D.Kraus, Antennas, 2nd Ed, McGraw Hill, 1988, que atribui conceitos a respeito de antenas, dentre outras bibliografias como Skolnik. M., Radar Handbook (SKOLNIK, 2008), MIT Radiation Laboratory Series, etc



## 4 CONCEITOS E VISÃO GERAL DO SAR

### 4.1 INTRODUÇÃO

Os radares imageadores de visada lateral de abertura real (SLAR) apresentavam restrições para a obtenção de imagens com boa resolução espacial, tamanho do pixel, e também para colocá-los em satélites e aviões voando a grande altitude seria necessário uma antena de centenas de metros, o que tornaria inviável operacionalmente. Como solução foram desenvolvidos os radares de abertura sintética (SAR).

A tecnologia SAR é utilizada atualmente em todos os radares orbitais e aerotransportados, dispõem de uma antena relativamente pequena (de alguns metros apenas), mas que sintetiza, por meio de uma operação matemática complexa, uma antena de centena de metros. Ou seja, o radar percorre a linha de voo estabelecida, emitindo uma série de feixes consecutivos e, posteriormente, os une em uma matriz de antenas, simulando ser uma única grande antena.

Isso só acontece graças a diversas operações matemáticas (Tópico 4.4) que analisam a intensidade do feixe de retorno, deduzindo a posição do objeto capturado em uma visada, e assim, comparando com as posições presentes em outros looks, determinando por fim a posição real do objeto capturado, gerando assim os dados necessários para produzir a imagem da faixa de imageada, que serão processados pelo algoritmo SAR. (MENESES; ALMEIDA, 2012)

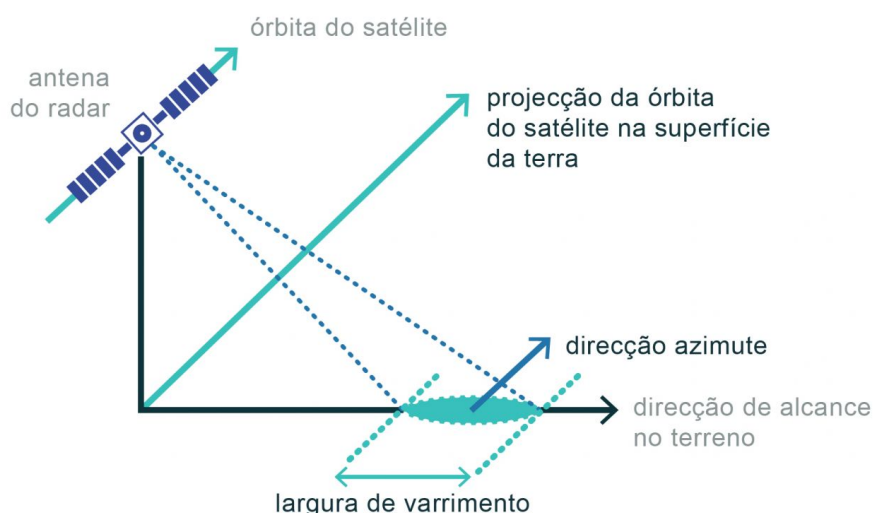


Figura 4.1 – Princípios do SAR.(Sophia, 2015)

Esquema abaixo (Figura 4.2) demonstra o ganho pelo tamanho da abertura da antena, que direciona o sinal em uma direção, fazendo assim um maior relação sinal ruído; logo, quanto maior a antena mais forte e maior será o sinal, o que torna o SAR, com sua abertura sintética, mais potente e produtivo.



Figura 4.2 – Funcionamento de uma antena.(Charvat, Gregory et all., 2011)

#### 4.2 EMISSÃO E RECEPÇÃO DAS ONDAS

Os comprimentos de onda que os radares podem emitir são denominados pelas letras X, C, S, L e P. Essa nomenclatura é aleatória e foi criada durante a Segunda Guerra Mundial como uma forma de confundir os inimigos, assim não era possível saber qual comprimento de onda estava sendo utilizado por cada radar. Na forma que está colocada a sequência dos comprimentos de ondas estão do menor para o maior. E cada um tem uma característica que vai interagir com a superfície gerando informações distintas para a separabilidade de cada cena-alvo, levando em conta tamanho, formas, densidade, etc.. Atualmente está sendo mais usado a frequência da onda ao invés de seu comprimento, haja vista que ao atingir alvos de diferentes densidades o comprimento pode se alterar, já a frequência não se altera.(MENESES; ALMEIDA, 2012)

Os radares de abertura sintética podem ser classificados de forma mais simples como ativos, aqueles que emitem suas próprias ondas eletromagnéticas. O grande ponto vantajoso dos sistemas ativos é a sua independência das condições climáticas, justamente pelo fato de ser sua própria fonte eletromagnética e pelas características dessas ondas que são muito maiores que as partículas que compõem a atmosfera.

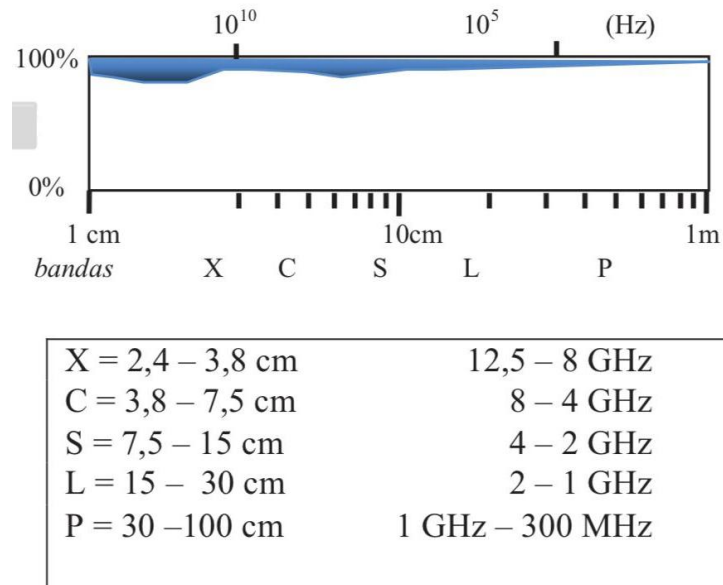


Figura 4.3 – Frequências e comprimentos de ondas eletromagnéticas em um radar.(MENESES; ALMEIDA, 2012)

Na figura 4.4 abaixo é apresentado de forma geral como funciona o imageamento de um SAR, o qual captura informações das áreas iluminadas ao longo do alcance (range) a cada instante, desse modo ao seguir sua direção de voo reunirá e processará os dados, obtendo assim a imagem de toda a faixa imageada.

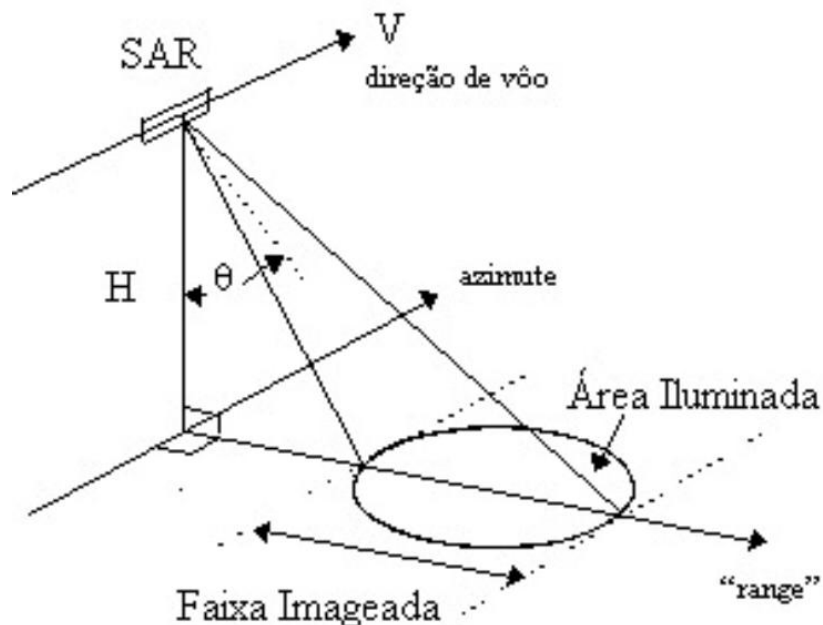


Figura 4.4 – Faixa de imageamento do SAR.(Inpe, 2019)

Na figura abaixo (Figura 4.5) é mostrado um esquema de como é feito recebimento do sinal retroespalhado. O coletor fica responsável por receber a energia, a qual pode ser coletada por meio de uma lente, espelho, antena, etc. Em seguida, o detector capta a

energia de uma determinada faixa do espectro e o processador faz a codificação, gerando assim o produto final, que seria a imagem do radar SAR.

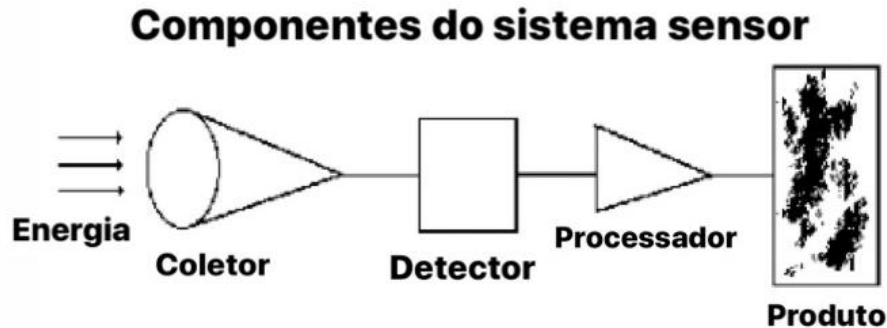


Figura 4.5 – Esquema da recepção do sinal.

#### 4.2.1 Slant Range e Ground Range

O Slant Range e o Ground Range são conceitos que estão relacionados com a forma como a imagem SAR é formada e apresentada como um produto. (Figura 4.6)

O Slant Range é a distância entre o radar de abertura de sintética e o alvo, que é dada pelo produto do tempo com a velocidade da luz (sendo a luz uma onda eletromagnética, sua velocidade independe do comprimento de onda usado). Este tem que ser dividido pela metade por se tratar do caminho de ida e retorno da onda. Todas as imagens SAR são formadas em slant range, logo apresentam distorções geométricas inerentes a esse processo.

O Ground Range está relacionado diretamente com o Slant Range, e é uma forma de reprojeção da imagem gerada pelo radar diminuindo as distorções geométricas apresentadas nas imagens slant range. Essa transformação é possível pelas características geométricas presentes entre as imagens em slant range e ground range. Por ser a mesma distância entre o radar e o alvo, porém desprezando a altura entre o radar e a superfície. Sendo assim, a distância de Ground Range é o produto da distância de Slant Range com o seno do ângulo de visada.

$$GR = \text{sen}(\beta) \cdot SR$$

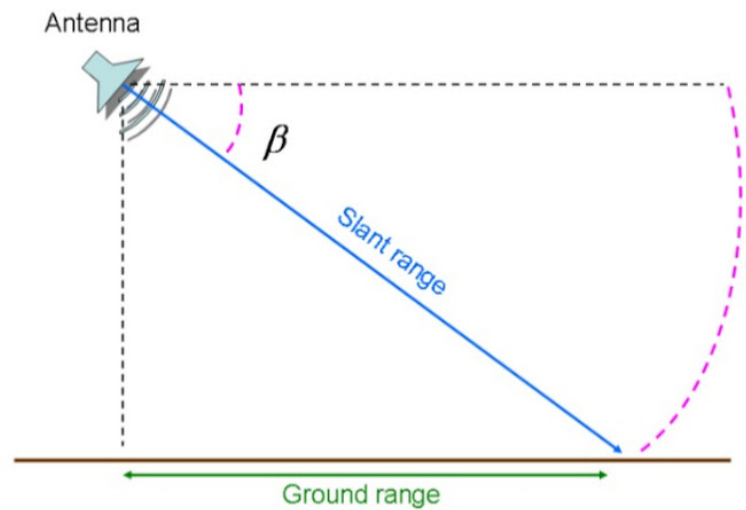


Figura 4.6 – Slant range e Ground range.(Erika Pitella, 2019)

#### 4.2.2 Amplitude e Fase

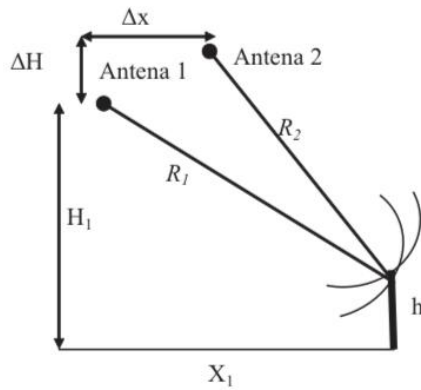
O período ( $t$ ) usado para calcular a distância do transmissor ao alvo é medido através do ângulo de fase da onda emitida. O ângulo tem seu valor registrado no instante em que o pulso é lançado ( $t = 0$ ). Tendo em vista que a onda é um fenômeno cíclico, semelhante às funções trigonométricas, o ângulo de fase é geralmente medido em graus, de forma que 90 graus representa um quarto do ciclo e 360 graus representa um ciclo completo. A fase da onda de retorno é comparada algebricamente com a fase da onda emitida e, assim, o tempo de retorno do pulso é calculado, para enfim determinar a distância (Slant Range) do alvo capturado.

#### 4.3 INTERFEROMETRIA

A interferometria SAR (InSAR) é utilizada para medir elevações do solo e poder gerar modelos em 3D do terreno ou deslocamento na superfície. O processo InSAR consiste na análise de duas imagens de uma mesma área em diferentes datas geradas por sensores separados, onde é possível identificar mudanças no relevo tanto vertical como horizontal; ou por dois sensores separados por uma distância conhecida e denominada linha base para gerar os modelos digitais de elevação ou modelos 3D. Que possuem ligeiras diferenças de fase entre si e com uma pequena diferença de ângulo de visada.

Cada pixel das imagens é representado por um número complexo que contém a amplitude do sinal de retorno e a sua fase. O interferograma é então criado pela multiplicação cruzada de cada pixel nas duas figuras capturadas, o que com um filtro de amplificação do sinal de fase é processado por um geocodificador que gera a imagem 3D da seção anali-

sada.(European Space Agency, 2007). A diferença de fase é dada pela equação 4.6, em função da diferença dos percursos  $R_1$  e  $R_2$ . Por sua vez,  $R_1$  e  $R_2$  podem ser obtidos em função da posição da plataforma em relação à posição do alvo, por meio de relações de triângulo retângulo, o que resulta nas equações 4.7 e 4.8.(MENESES; ALMEIDA, 2012)(Figura 4.7)



$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1) \quad \text{eq. 4.6}$$

$$R_1 = \sqrt{x_1^2 + (H_1 - h)^2} \quad \text{eq. 4.7}$$

$$R_2 = \sqrt{(x_1 - \Delta x)^2 + (H_1 + \Delta H - h)^2} \quad \text{eq. 4.8}$$

Figura 4.7 – Representação de duas antenas imageando o mesmo ponto para obter a diferença de fase.(MENESES; ALMEIDA, 2012)

#### 4.4 ALGORITMO SAR

Levando em consideração um radar de abertura sintética em órbita e com todas as suas funções operando de acordo com o desejado é possível discorrer a respeito da correlação existente entre cada termo restritivo existente em um SAR. Nesse sentido, o radar composto de uma antena que irá emitir sucessivos pulsos eletromagnéticos, de alta potência e de feixe estreito, em uma direção ortogonal a plataforma de vôo do radar, conhecida como azimutal, até o feixe atingir o alvo e ser retroespalhado. Desta forma, nesta ação temos vários processos relacionados, até a obtenção da imagem final.

Um radar SAR opera através de uma pequena antena retangular, fixada ao lado da aeronave ou satélite que faz medições do tempo de retorno do sinal retroespalhado pelo objeto, medindo assim a posição do objeto (range) em relação à antena, assim, relacionado ao processo de range temos a polarização da onda, que influi na obtenção da localização do objeto. Neste contexto, a onda emitida pela antena retangular é polarizada em duas direções H (horizontal) e V (vertical), através da manipulação do sentido do vetor campo elétrico, pois uma onda proveniente de fontes eletromagnéticas são despolarizadas. Desse maneira, quando a onda polarizada atinge o alvo é despolarizada novamente sendo que o retorno deste pulso será com uma intensidade diferente, em relação a emitida, e também em outra direção de polarização, que influenciará na obtenção do range de um objeto. Visto isso, a direção de polarização da onda influencia na obtenção do range, como por

exemplo, o uso de uma determinada direção de polarização que não confere eficiência em um determinado ambiente, fazendo assim com que o processo se torne mais difícil, como por exemplo a polarização HH em alto mar. Outra característica importante que relaciona-se com a onda polarizada são os ângulos de incidência da onda eletromagnética na superfície. Desta forma, ao ser emitido em uma direção azimutal, o pulso ilumina uma área determinada de lóbulo, onde esta se relaciona com o range do radar de maneira que a posição referente à área mais próxima antena é determinada de near range e a mais afastada de far range, o que difere no tempo da obtenção de range, pois para um objeto na parte mais distante do lóbulo o tempo será maior. Ademais, temos que o range, e os parâmetros do lóbulo relacionam-se com a direção de visada, que é basicamente a direção na qual temos o lóbulo, ou seja, a direção na qual o pulso é propagado.(MENESES; ALMEIDA, 2012)

Partindo disso, ao atingir a superfície temos a ocorrência da formação de vários ângulos que se relacionam com a obtenção da imagem ao longo do lóbulo que são os ângulos de depressão, visada e incidência local. Assim, analisando o ângulo formado entre a linha do horizonte de vôo da plataforma e a linha que define a direção de visada, definido como ângulo de depressão, evidencia-se que este ângulo influi diretamente na obtenção da imagem e range de um objeto, visto que este na área iluminada varia do near range para o far range e é inviável ler objetos para um ângulo de depressão que antecede a área inicialmente iluminada pelo lóbulo.

Portanto, para o funcionamento do SAR este ângulo deve ser definido como a média dos dois ângulos de depressão relativos ao near range e o far range, na finalidade de obter informações a respeito de uma área. Além disso, complementando o ângulo de depressão temos o ângulo de visada, sendo este de grande importância no processo de resolução de objetos, pois a variação do ângulo de visada em relação à horizontal da linha de vôo da plataforma irá fazer com que tenhamos uma variação da área que estamos analisando(lóbulo), podendo assim através dessa variação imagear objetos que estão em uma distância maior ou menor da antena. Visto isso, este ângulo faz com que ocorra a variação dos ângulos de depressão, na tentativa de aumentar o alcance do lóbulo os ângulos de depressão diminuem na medida em que o este ângulo aumenta, e também aumentam, na medida que este ângulo diminui. Por fim, temos o ângulo de incidência local, que é medido em relação a direção de propagação do pulso do radar e a normal do plano onde o pulso toca, fazendo com que este ângulo seja dependente do plano onde o pulso é direcionado. (MENESES; ALMEIDA, 2012)

Como resultado disso, este ângulo influencia nas características referentes ao pulso retroespalhado, visto que é definido pelo meio onde se localiza, de maneira que quanto menor for este ângulo maior será a intensidade de retorno do sinal. Em seguida, dependente de todos os critérios citados anteriormente dispomos da resolução das imagens obtidas pelo SAR, onde esta é dividida em resolução espacial e resolução azimutal. A resolução

especial é função de duas outras resoluções espaciais, pois infere-se que a célula de resolução espacial de um radar SAR é controlada pelo comprimento do pulso e pela largura angular de feixe, onde estes dois mecanismos são independentes. Visto acima, temos a resolução de range, que é definida em relação a direção de propagação do feixe, ou seja, na direção do lóbulo iluminado, e a resolução azimutal, definida em relação a linha de vôo do satélite ou aeronave. Logo, a resolução de range, é dependente da geometria de imageamento, pois podemos afirmar que a partir de uma certa geometria de imageamento não podemos resolver objetos que estão em um determinado range, formando assim imagens superpostas por exemplo. Relacionada a largura angular do feixe, a resolução azimutal também depende das medidas angulares do feixe transmitido, de maneira que quanto menor é a abertura angular do feixe transmitido, maior é a resolução azimutal.(MENESES; ALMEIDA, 2012)

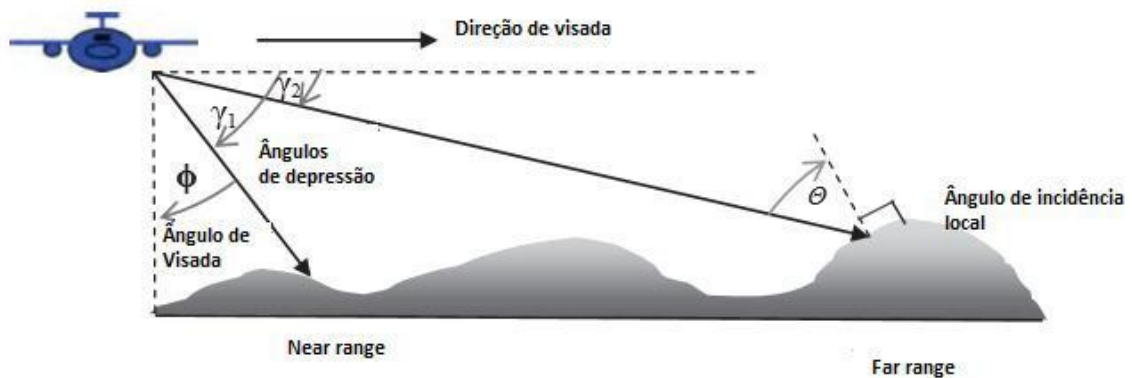


Figura 4.8 – Relação de ângulos no funcionamento do SAR.(MENESES; ALMEIDA, 2012)



## 5 DESCRIÇÃO DO PROJETO DE UM RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA

### 5.1 INTRODUÇÃO

O projeto aqui detalhado consiste em um estudo sobre o protótipo concebido por uma turma de estudantes do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT): um exemplar de baixo custo de um modelo de radar de Onda Contínua - Frequência Modulada (FM-CW), tendo aplicabilidade para o sensoriamento de distâncias médias e pequenas, haja vista o seu alcance de range que não é potente.

Nesta seção contém as informações que abrangem detalhes do exemplar, tais como: seu sistema de operação, seus componentes (e uma breve discriminação dos mesmos), o custo teórico do projeto, a descrição da fabricação e montagem. Para trabalhar com todas as informações coletadas pelo protótipo e as assimilar em um único resultado, uma única imagem, a sua operação é vinculada a um software interativo de alta performance, neste caso o MATLAB (Tópico 5.9), visto que este pode executar programas importantes, como o processamento de sinais e a interpretação de dados.(Charvat, Gregory et all., 2011)

Outra informação importante a respeito do modelo em estudo é sobre a banda de operação; este trabalha em banda S com comprimentos de onda que variam de 7,5 a 15 cm, e uma frequência de 2.4GHZ.(Figura 5.1)

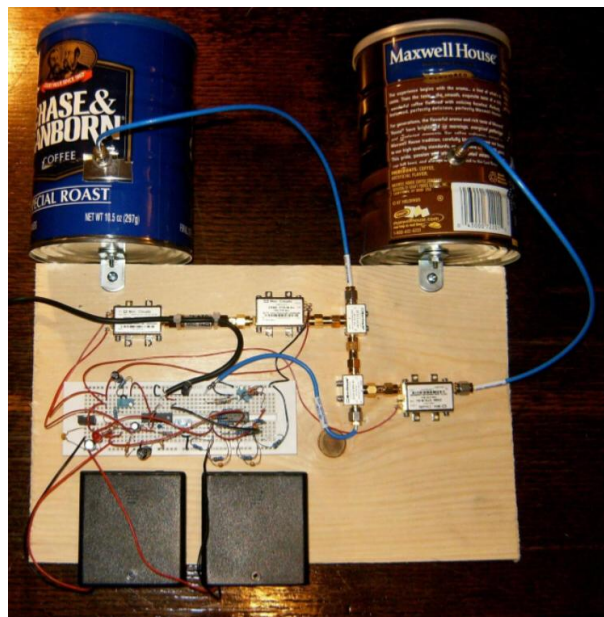


Figura 5.1 – Foto do radar de abertura sintética feito pelo MIT.(Charvat, Gregory et all., 2011)

## 5.2 COMPONENTES

Os componentes principais do projeto do Radar de Abertura Sintética podem ser vistos na Figura 5.2 abaixo.

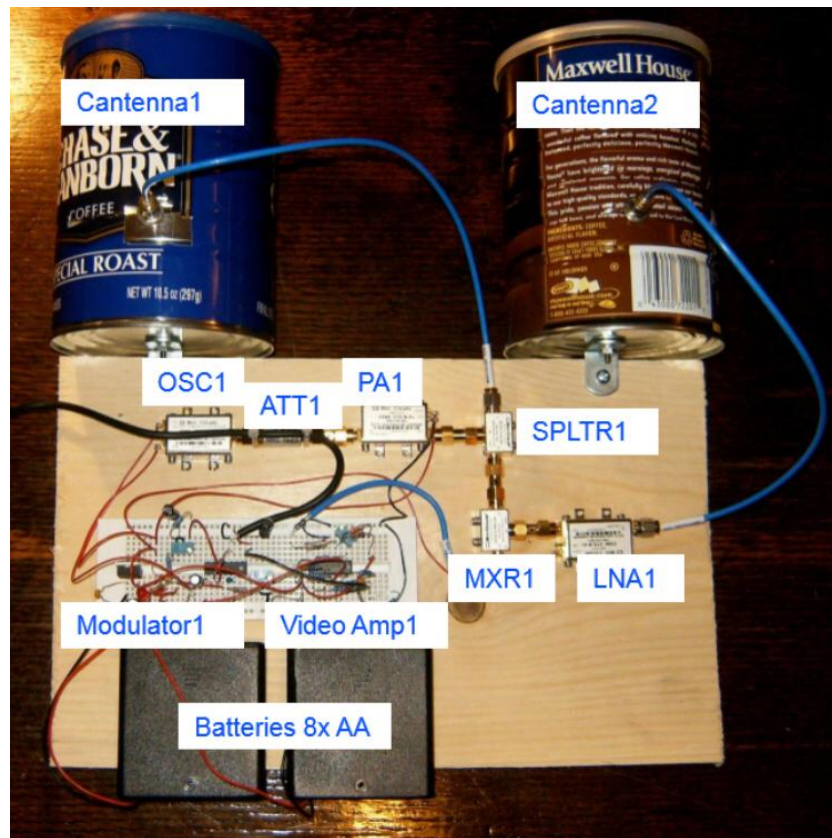


Figura 5.2 – Esquema de exemplificação dos mecanismos.(Charvat, Gregory et al., 2011)

Sendo que:

- OSC1 é o oscilador controlado por tensão, é um tipo de oscilador que a frequência depende da tensão de entrada. Logo, quando ocorre uma variação na tensão muda a faixa da frequência. Portanto, é necessário para que o radar opere na frequência de 2.4GHZ
- MODULATOR1 é um modulador de radiofrequência utilizado para modular uma radi-frequência em um sinal de vídeo ou de áudio. Além disso, ele produz um sinal onde a frequência aumenta com o tempo, onde está é modulada com o input do OSC1 vtune. Sendo as propriedades do modulador:
  - Voltagem do VTUNE proporcional a frequência transmitida.
  - O aumento linear da voltagem do VTUNE faz com que o OSC-1 produza uma frequência linear que aumenta com o tempo, usada para transmitir e receber sinais.

- Controla a magnitude da frequência chirp (sinal onde a frequência que aumenta com o tempo) para a banda de transmissão desejada.
- Produz um sinal de recepção sincronizado com o início do sinal CHIRP.
- ATT1 é um transmissor de sinal que lê certos sensores e realiza a retransmissão em uma faixa programável, onde este faz com que o sinal CHIRP varie.
- PA1 é um amplificador de potência Power Amplifier, mecanismo que amplifica a voltagem do OSC1.
- SPLTR1 é um divisor de passagem de potência Power passing splitter ou divisor de passagem de potência é um dispositivo onde este capta um sinal transmitido por um cabo e retransmite para os demais cabos conectados a extremidade oposta do mesmo.
- CANNTENA é a antena caseira feito de latas de metal, é usada para aumentar o alcance ou a qualidade do sinal.
- LNA1 é um amplificador de baixo ruído low noise amplifier, possui a função de amplificar um sinal baixo sem degradar o SNR(Signal-to-noise ratio) que é a razão entre a potência do sinal e a potência do ruído do mesmo.
- MXR1 é o conector mixer MXR1, transforma os sinais da frequência imediata (IF) em sinais RF e vice-versa. A frequência imediata é a frequência na qual a onda transportadora (onda modificada por um sinal de input com o propósito de transportar informações) é deslocada para fins de transmissão ou recepção de sinais. Além disso, vale ressaltar que no transmissor do radar o mixer converte os sinais IF em sinais RF, e no receptor ocorre o contrário.
- Vídeo AMP-1 é o amplificador de vídeo, que amplifica os sinais de vídeo, uniformemente, até uma certa faixa de frequência, preservando a forma do sinal.

### 5.3 DIAGRAMA DE BLOCO

O diagrama de bloco do radar de abertura sintética representa as partes básicas para o funcionamento do radar, que consiste de um sincronizador de vídeo no lado esquerdo e uma saída de vídeo do lado direito. Assim, partindo de um radar SAR com uma arquitetura de bloco equivalente ao da imagem referente ao diagrama de bloco, operante, temos que é possível discutir sobre o seu funcionamento discorrendo e correlacionando cada termo existente no diagrama de bloco.

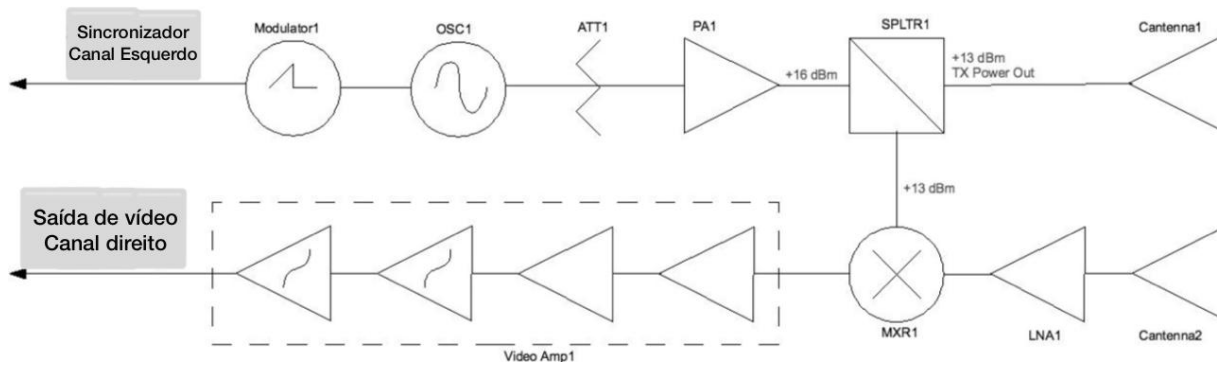


Figura 5.3 – Diagrama de bloco do projeto do radar de abertura sintética.(Charvat, Gregory et all., 2011)

Inicialmente, temos que o processo de transmissão do sinal pela Cantenna 1 é iniciado no modulador de radiofrequência, MODULATOR1, o qual produz um sinal onde a frequência aumenta com o tempo, denominado de sinal UP-CHIRP . Em seguida, temos a equação que representa a variação da frequência associada ao sinal CHIRP no decorrer do tempo, onde o parâmetro B é a largura da banda, T é a duração do crescimento do sinal UP-CHIRP, fo é a frequência inicial e o t é o instante de tempo no qual estamos interessados em saber.(SMITH, 2003)

$$f(t) = f_0 + (B/T) * t \quad (5.1)$$

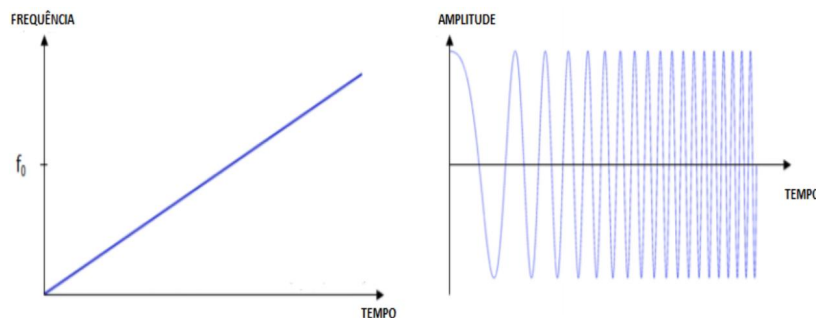


Figura 5.4 – Representação do sinal CHIRP.(SMITH, 2003)

Desse modo, este sinal CHIRP associa-se com o oscilador controlado por tensão, OSC1, produzindo uma frequência linear ideal para transmissão de sinais. A partir desse contexto, o amplificador de voltagem PA1 executa a função de manter a voltagem do OSC1, tendo em vista que o oscilador controlado por tensão OSC1 depende do PA1, visto que para este mudar a frequência de transmissão do sinal é preciso alterar a tensão, na finalidade de atingir uma faixa ideal para transmissão. Por fim, temos o divisor de potência SPLTR1 que divide a potência do sinal de radiofrequência imposta pelo módulo RF, diante disso o SPLTR1 alimenta o mixer e a antena transmissora, fazendo com que ocorra a transmissão do sinal.

Por conseguinte, partimos para a análise de um pulso eletromagnético que é recebido pelo Antena 2, onde esta funciona como receptor. Visto isso, o sinal recebido é amplificado pelo amplificador LNA-1 onde neste processo o LNA-1, low noise amplifier, amplifica este sinal que é considerado baixo, sem degradar o SNR, signal-to-noise ratio, que é a razão entre a potência do sinal e a potência do ruído do mesmo, preservando assim as características do sinal original recebido. Dessa forma, temos que o amplificador é conectado na entrada RF do mixer MXR1, que tem como principal função no bloco realizar uma transformação de sinais, de rádio frequência para frequência imediata e vice-versa, assim sendo a frequência imediata, IF, caracterizada pela frequência na qual a onda que transporta os sinais é modificada com o propósito de carregar informações e a frequência RF, conhecida como a frequência na qual temos ondas de rádio. (TutorialsPoint, 2019)

A partir do contexto acima, o sinal transmitido pelo amplificador é convertido e em seguida este passa por uma técnica de processamento de sinais a fim de termos resultados a respeito deste sinal no display. Neste procedimento, o sinal modificado pelo mixer é direcionado ao amplificador de vídeo AMP-1, o qual é responsável por amplificar tais sinais até certa faixa de frequência que torna possível a resolução dos dados de recebidos, preservando a forma do sinal.

#### 5.4 DESENHO DA ANTENA

A antena de guia de onda circular é um antena monopolar, composta de uma secção circular de metal, onde este é chamado de guia de ondas. Desse modo, este dispositivo de metal é capaz de direcionar as ondas eletromagnéticas. Assim, a antena monopolar é um tipo de antena que opera com ondas de rádio. A antena é composta de um conector micro-ondas, onde este é responsável por conectar cabos em sistemas que operam com o espectro de micro-ondas. Além disso, o mecanismo responsável por proteger a antena do radar, Radome, é uma estrutura de plástico, pois este atenua minimamente o sinal.

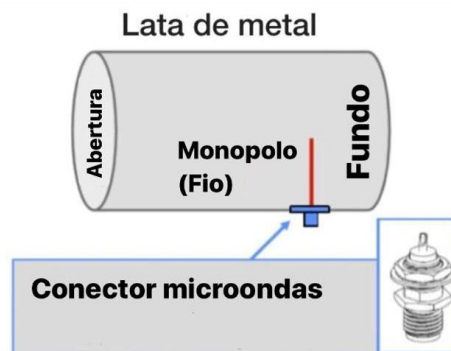


Figura 5.5 – Diagrama representando os componentes da antena. (Charvat, Gregory et al., 2011)

## 5.5 MÓDULO RF

O módulo de radiofrequência consiste de um transmissor e um receptor, é responsável pela emissão e a recepção de sinais de rádio. Assim, os mecanismos relacionados a este são o oscilador controlado por tensão, o atenuador, amplificador, splitter e o mixer. Sendo que o transmissor emite uma onda modulada denominada onda carregada, carrier wave, amplifica-a e a irradia através da antena. E o receptor recebe a carrier wave através da antena, amplifica-a e traduz a frequência da mesma.

Na cadeia de componentes do módulo RF temos:

- Componente conectorizado, que constitui de uma estrutura metálica designada para proteger o circuito interno e o chip do fluxo de calor e impactos mecânicos.
- Circuito integrado, que é um circuito eletrônico integrado capacitivo, chip capacitor, montado diretamente sobre a placa do circuito impresso, denominada packaged IC.
- Modelo de rede de duas portas, que consiste em uma rede elétrica com dois pares de terminais para se conectar-se a circuitos externos.

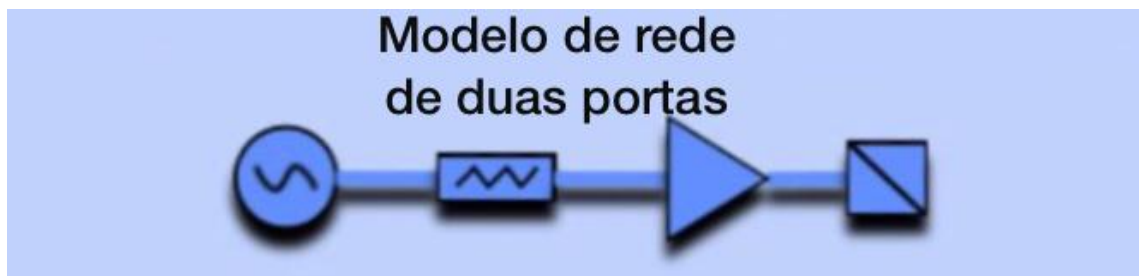


Figura 5.6 – Modelo de rede de duas portas.(Charvat, Gregory et all., 2011)

Algumas características referentes ao design do módulo são a frequência igual a 2.4GHZ, a isolamento da antena, que é de 50dB, a sua potência que é <1Watt e a sua forma contínua de onda.

## 5.6 ALIMENTAÇÃO

O sistema de alimentação do radar é composto por 2 pacotes de baterias, nos quais cada um possui 4 baterias do tipo AA. Além disso, um pack produz uma voltagem de 6V enquanto o outro produz 12V. Além disso, temos 17 reguladores VDC, responsáveis por fornecer uma voltagem constante, onde 5 destes fornecem energia para os componentes RF e para os circuitos análogos. Desse modo, os 5 reguladores VDC são alimentados pelas baterias de 6V. Os demais reguladores VDC são responsáveis por fornecer tensão para os circuitos do modulador e do amplificador de vídeo, onde estes são alimentados por baterias de 12V.

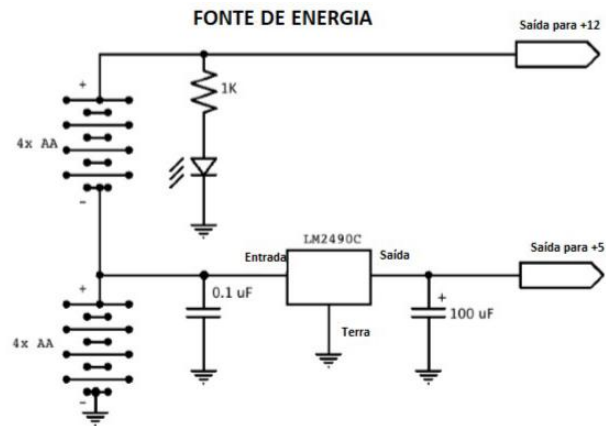


Figura 5.7 – Diagrama da fonte de alimentação do radar.(Charvat, Gregory et all., 2011)

## 5.7 TABELA DE PREÇOS

Todos os valores apresentados na tabela a seguir, que passaram pela cotação do Real estabelecido no dia 28/09/2019 (1 real = 4,16 dólares), foram encontrados nos endereços eletrônicos das lojas Mini-Circuits, Avnet, Master, Mouser, Jameco, Digi-Key, Americanas e Dapia. O custo total foi estimado em 2.041,38 reais, descontando o valor da Peça de Madeira ainda não definido, de impostos e transferências.

Nome da peça	Unidades	Preço por unidade (desprezando impostos e frete)
Oscilador controlado por tensão(VCO)	1	R\$ 412,63
Adaptador fêmea x SMA macho	1	R\$ 58,17
Amplificador de baixo ruído	2	R\$ 291,69
Divisor de potência	1	R\$ 145,74
Conector mixer (double balanced mixer)	1	R\$ 193,70
Adaptador SMA macho x SMA macho	4	R\$ 24,81
Suporte em L	2	R\$ 1,80
Conector coaxial	2	R\$ 28,94
Parafuso Phillips de cabeça redonda - aço - Totalmente rosqueado (6-32)	1 (pacote com 100)	R\$ 19,35
Porcas sextavadas em aço	1 (pacote com 100)	R\$ 5,34
Arruelas de pressão (6-32)	1 (pacote com 100)	R\$ 2,96
Interconector flexível	3	R\$ 54,00
Parafusos Phillips de cabeça redonda - madeira -	1 (pacote com 100)	R\$ 22,64
Medidas longas de fita com alta visibilidade	1	R\$ 54,13
Madeira 30cm x 3cm x 20cm	1	preço a definir
Gerador de função monolítica - XR2206	1	R\$ 33,15
Amplificador MAX414CPD+	1	R\$ 37,57
Protoboard 550 furos	1	R\$ 31,07
Capacitor cerâmico	4	R\$ 1,75
Filme axial do metal do resistor (do furo passante) (8.45kohms +/- 1% 0,25watts)	1	R\$ 0,42
Filme axial do metal do resistor (do furo passante) (10.2kohms +/- 1% 0,25watts)	1	R\$ 0,42
Filme axial do metal do resistor (do furo passante) (7.15kohms +/- 1% 0,25watts)	1	R\$ 0,42
Filme axial do metal do resistor (do furo passante) (1.0kohms +/- 1% 0,25watts)	1	R\$ 0,42
Filme axial do metal do resistor (do furo passante) (12.1kohms +/- 1% 0,25watts)	1	R\$ 0,42
Filme axial do metal do resistor (do furo passante) (17.5kohms +/- 1% 0,25watts)	1	R\$ 0,42
Filme axial do metal do resistor (do furo passante) (28.0kohms +/- 1% 0,25watts)	1	R\$ 0,42
Filme axial do metal do resistor (do furo passante) (4.2kohms +/- 1% 0,25watts)	1	R\$ 0,42
Filme axial do metal do resistor (do furo passante) (1.62kohms +/- 1% 0,25watts)	1	R\$ 0,42
Capacitor cerâmica multicamada	2	R\$ 1,42



Nome da peça	Unidades	Preço por unidade (desprezando impostos e frete)
Capacitor eletrolítico	2	R\$ 0,88
Resistor de 10kohms	1	R\$ 5,96
Resistor de 200ohms	1	R\$ 1,38
Pack para bateria(4 pilhas AA)	2	R\$ 9,38
Pilha AA	pacote com 8	R\$ 16,63
Regulador de tensão linear	1	R\$ 9,82
Conjunto de cabo RF AMC RA plug micro cable	1	R\$ 22,39
Amarres de cabo 4"18LBS	2	R\$ 1,33
Capacitores de cerâmica multicamada MLCC - com chumbo 0.47mFaraday 25V Y5V + 80-20%	1	R\$ 1,29
Trimpots - vazados 2.0Mohms 10mm Square 25 turn	1	R\$ 6,26
Trimpots - vazados 50k 10%	1	R\$ 6,26
Capacitores eletrolíticas de alumínio - revestimento radial com chumbo 50V 1mFaraday	1	R\$ 0,42
Capacitores eletrolíticas de alumínio - revestimento radial com chumbo 50V 10mFaraday	2	R\$ 0,71
Resistores de filme metálico - orifício de passagem 1/4watts 5.1kohms 1%	2	R\$ 0,96
Resistores de filme metálico - orifício de passagem 1/4watts 10kohms 5% rated to 1/2watts	2	R\$ 0,42
Resistores de filme metálico - orifício de passagem 1/4watts 1kohms 5% rated to 1/2watts	1	R\$ 0,42
Resistores de filme metálico - orifício de passagem 1/4watts 100kohms 5% rated to 1/2watts	2	R\$ 0,42
Resistores de filme metálico - orifício de passagem 1/4watts 47kohms 5% rated to 1/2watts	12	R\$ 0,42
Leds padrão - vazados red tinted difused	1	R\$ 1,63
Capacitor de filme 50V - eletrolítico	1	R\$ 0,83

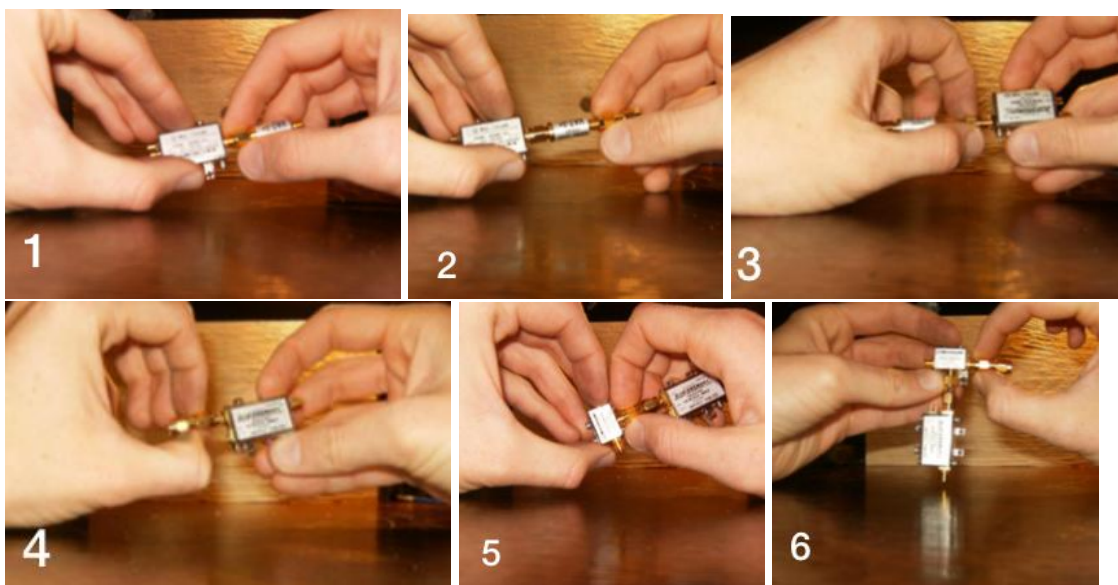
## 5.8 FABRICAÇÃO

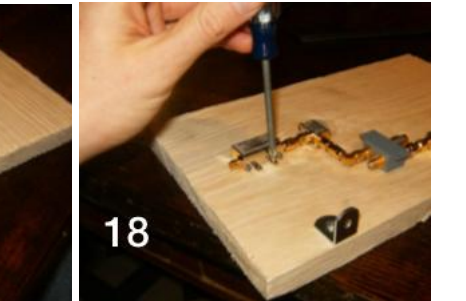
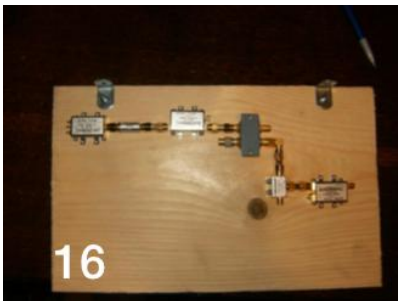
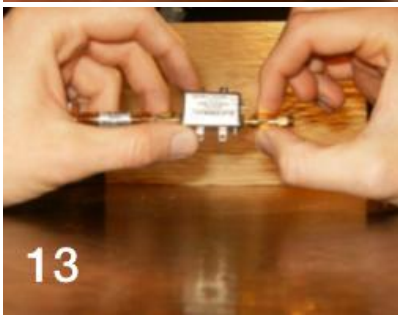
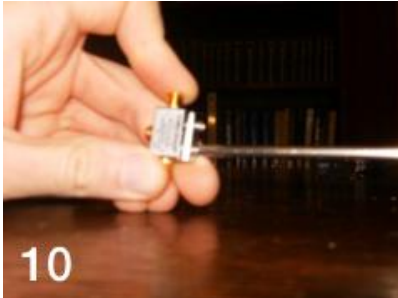
### 5.8.1 Antena

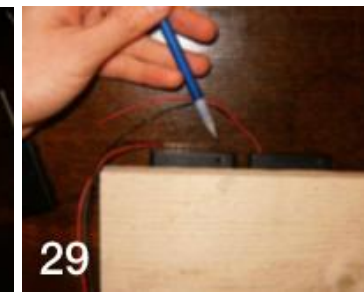
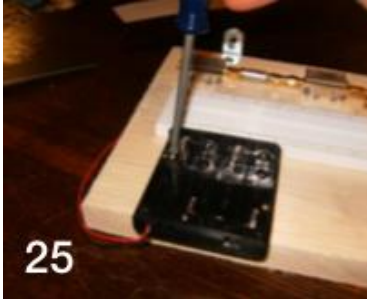
O passo a passo da montagem da antena está descrito:

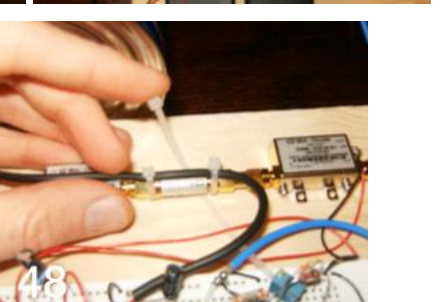
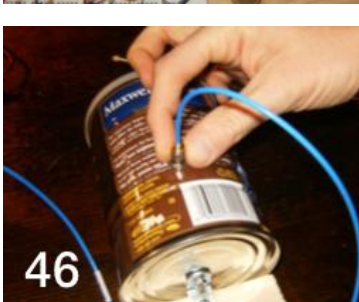
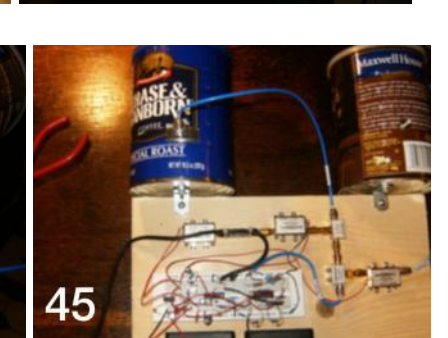
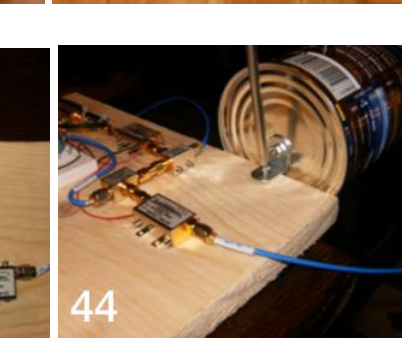
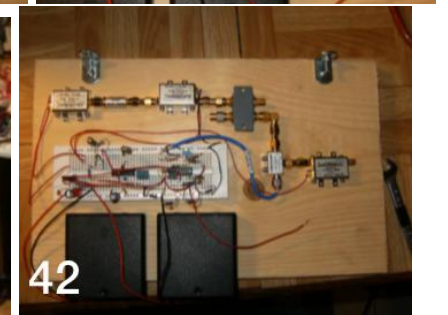
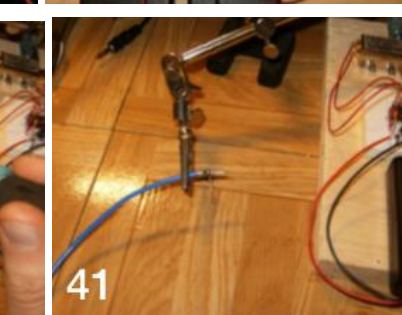
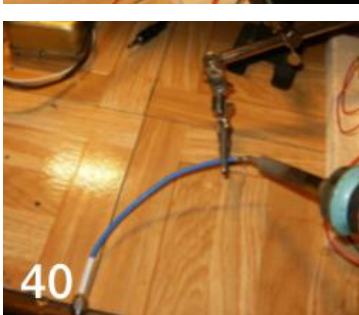
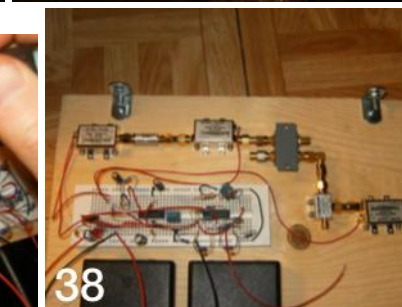
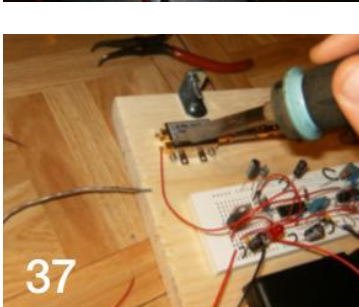
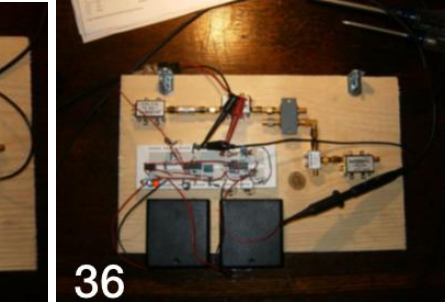
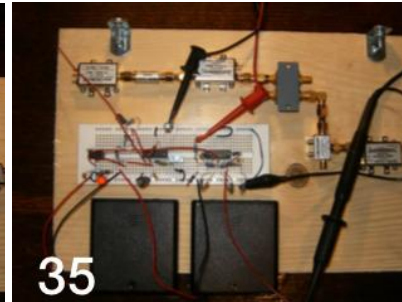
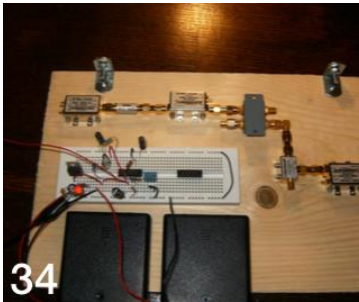
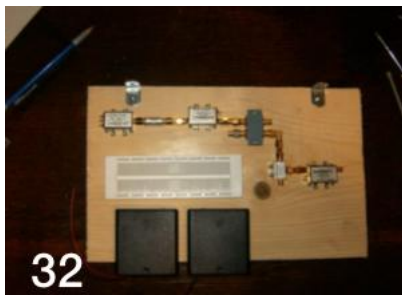
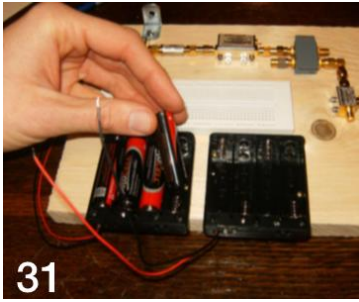
- Faça um furo na lateral da lata de metal para o conector, com aproximadamente 4,57 cm da parede traseira.
- Conecte o conector de micro-ondas, com fio monopólio, com aproximadamente 3,8cm de comprimento, soldado no pino central do conector (conector aterrado com segurança à superfície metálica da lata).
- Conecte o cabo coaxial de micro-ondas do analisador de rede à antena da lata que será utilizada no processo.
- Corte o comprimento o fio monopolar em pequenas quantidades até que o coeficiente de reflexão medido (perda de retorno) seja menor que cerca de -10dB sobre a banda de rádio industrial (2,4 a 2,5 GHz). O comprimento aparado no final do fio monopólio deve ser de cerca de 3cm, conforme medido da ponta do monopólio até a base do conector na superfície interna da lata de metal.
- Meça a potência relativa acoplada entre duas antenas montadas uma de frente para a outra a 1 metro de distância e calcule o ganho da antena em 2,4GHz. As polarizações da antena devem estar alinhadas.
- As antenas estão prontas para integração com um notebook.

### 5.8.2 Montagem









Iniciando o processo de montagem:

FIGURA 1: Inicialmente, rosqueie o atenuador de 3dB adaptador fêmea x SMA macho no oscilador controlado por tensão.

FIGURA 2: Em seguida, como pode ser observado, deve-se enroscar o adaptador SMA macho x SMA macho em um adaptador fêmea x SMA macho.

FIGURA 3: Coloque o amplificador de baixo ruído enroscado na entrada para adaptador fêmea x SMA macho.

FIGURA 4: Em seguida, localize o segundo módulo no amplificador de baixo ruído e rosqueie um adaptador SMA macho x SMA macho em sua saída.

FIGURA 5 e 6: Passe o SMA na saída do LNA1 para a porta RF do MXR1 e em seguida rosqueie um SMA-SMA na porta LO do MXR1.

FIGURA 7,8 e 9: Nessas figuras, são demonstradas as etapas onde é necessário que se remova o suporte de montagem do conector mixer, junto os dois parafusos phillips e, também, o suporte de montagem e, após, enroscar os parafusos novamente no conector.

FIGURA 10,11 e 12: Nessas figuras, são demonstradas as etapas. No entanto, em seu divisor de potência, faça o mesmo processo feito anteriormente para o conector mixer.

FIGURA 13: Enrosque o adaptador SMA macho x SMA macho na saída do amplificador.

FIGURA 14: Assim, rosqueie o conector SMA-SMA da porta LO do mixer MXR1 em uma das saídas de passagem de potência SPLTR1.

FIGURA 15: Enrosque adaptador SMA macho x SMA macho na saída do amplificador na entrada do divisor de potência. Assim, os componentes de micro-ondas devem ser conectados juntos através do adaptador SMA macho x SMA macho.

FIGURA 16: Após, coloque os componentes do micro-ondas no bloco de madeira.

FIGURA 17 e 18: Com os parafusos, aperte os componentes do micro-ondas em 2 ou mais locais ao longo da cadeia de sinais. Sendo necessário deixar espaço suficiente para os suportes que serão utilizados.

FIGURA 19, 20 e 21: Em uma tábua sem escórias, retire a camada protetora que há na parte inferior da tábua e cole-a logo abaixo do oscilador controlado por tensão, do transmissor de sinal ATT-1 e do amplificador PA-A1.

FIGURA 22 e 23: Utilize os dois suportes de baterias, cada um com 4X baterias AA. Em seguida remova as proteções frontais e faça dois buracos pequenos em cada canto de cada suporte de baterias.

FIGURA 24: Coloque os suportes de baterias logo abaixo da tábua sem solda e verifique se o botão liga/desliga está ficando sobre a borda do bloco de madeira.

FIGURA 25, 26, 27 e 28: Essas imagens descrevem a cada momento até finalização de tal processo. Nesse sentido, monte as baterias no bloco de madeira usando os parafusos adequados por meio dos orifícios de montagem perfurados na etapa anterior.

FIGURA 29 e 30: Verifique se os botões liga/desliga estão desligados para cada pack de bateria.

FIGURA 31: Coloque 8 baterias AA dentro dos suportes de bateria.

FIGURA 32: Coloque as tampas nos suportes de bateria e monte o circuito da planta de bateria na placa não soldada de madeira.

FIGURA 33: Em seguida, ligue os dois suportes e verifique seu funcionamento usando um voltímetro de +5v e e+5v.

FIGURA 34: Monte o modulador1 na placa não soldada de madeira, Teste o sinal de output e a sincronização usando um osciloscópio. Em seguida, usando o osciloscópio ajuste o modulador1 para um sinal de 20ms e uma magnitude de tensão de 2 à 3.2V para o chip ISM.

FIGURA 35: Monte o filtro ativo do amplificador de vídeo, vídeo AMP-1, na placa de madeira não soldada. Teste, conectando um gerador de onda senoidal no input e 2 escopos de canal para o output e para o input. Por fim, verifique o roll-off de -3dB a 15KHZ e o maior roll-off acima de 15KHZ.

FIGURA 36: Monte o estágio de ganho do amplificador de vídeo Amp-1 na placa de madeira não soldada. Em seguida, conecte um gerador de função para o input e um escopo de 2 canais para os dois, para o input e o output, verifique o ganho. Se funcionar, conecte a saída do estágio de ganho a entrada do filtro passa baixa ativo.

FIGURA 37 e 38: Solde as conexões da bateria para o input de bateria do dispositivo, VCC, ou +5 pinos do circuito integrado VDC no oscilador controlado por tensão, no amplificador de voltagem, e no amplificador de baixo sinal.

FIGURA 39: Soldando um fio terra no terminal de um dos módulos micro-ondas. Neste caso, foi escolhido PA1, mas não importa qual é o escolhido. Conecte esse fio terra ao ground bus na placa de madeira não soldada.

FIGURA 40 e 41: Corte um dos cabos coaxiais pela metade SMA-SMA, este irá ser usado para alimentar o output de frequência intermediária, IF, do mixer para o amplificador de vídeo, vídeo AMP1, na placa de madeira não soldada. Para realização do processo, retire o isolamento da extremidade da proteção a fim de revelar o condutor central e retire, também, o isolamento do semicondutor e Solde um pedaço de fio de conexão de fita simples ao redor da proteção do cabo coaxial.

FIGURA 42: Passe o cabo do SMA para o vídeo AMP1 na porta IF do mixer. Conecte a proteção na outra extremidade do ground bus na placa de madeira sem solda e, após, conecte o centro do cabo coaxial a entrada do circuito referente ao amplificador.

FIGURA 43: Quando completo, o layout dos componentes micro-ondas devem parecer com a imagem. Se disponível, conecte um analisador de espectro na entrada output do divisor de passagem de potência, SPLTR1, para checar a banda de transmissão.

FIGURA 44 e 45: Monte a antena, Cantenna1, e a antena, Cantenna2 no bloco de madeira usando 6 parafusos de madeira com  $\varnothing$  de comprimento, um para cada suporte L.

FIGURA 46 e 47: Conecte a antena receptora conectando o input no LNA1 na Cantenna2, usando um cabo coaxial SMA-SMA. Em seguida, Conecte a antena transmissora usando a entrada output não usada do SPLTR1 para a Cantenna 1, usando um cabo coaxial SMA-SMA.

FIGURA 48: Por fim, conecte o cabo de áudio na placa não soldada. Vermelho = canal direito, é alimentado ao output do vídeo AMP1; Branco = canal esquerdo, é alimentado na saída SYNC do modulator1. A proteção é conectada ao ground bus na placa não soldada de madeira. Então, amarre o cabo de áudio ao transmissor de sinal ATT1, para que o cabo de áudio não seja puxado facilmente para fora da placa não soldada.

## 5.9 CÓDIGO MATLAB

Os dois subtópicos a seguir demonstram o modo de usar do radar experimental, relacionando esse uso com os códigos de MATLAB (disponíveis em (Charvat, Gregory et al., 2011)) que processam os dados obtidos para gerar imagens do alvo.

### 5.9.1 Doppler vs tempo

Primeiramente coloque Vtune para CW, depois conecte à entrada de áudio do laptop, abra no modo "Sincronizar inibição de pulso", então coloque o radar perto de alvos em rápido movimento e grave o arquivo .wav da entrada de áudio.

Processe os dados usando read-data-doppler.m(código disponibilizado em (Charvat, Gregory et al., 2011)). O código vai analisar o arquivo .wav em 4410 blocos de amostra, e vai traçar a magnitude do log do IDFT de cada bloco. Gerando:

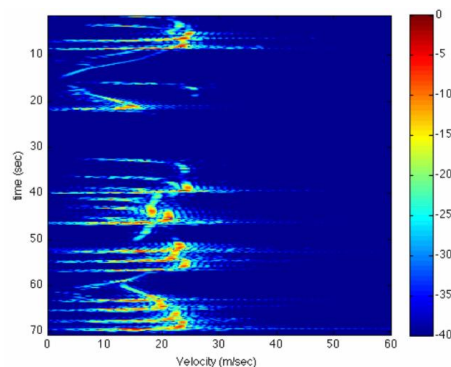


Figura 5.8 – Imagem obtida usando read-data-doppler.m.(Charvat, Gregory et al., 2011)



### 5.9.2 Imagem SAR

Primeiramente reconecte o Vtune à saída do modulador, então configure a duração up-ramp para 20 ms, ajuste a magnitude para abranger a largura de banda de transmissão desejada. Coloque o radar onde houver alvos móveis e grave um arquivo .wav.

Processe .wav usando read-data-RTI.m(código disponibilizado em (Charvat, Gregory et al., 2011)). O código vai procurar bordas crescentes do pulso de sincronização no canal esquerdo, economizando 20 ms de dados do canal direito da borda ascendente e colocando na matriz de perfis de alcance. Ele subtrai coerentemente o último perfil de faixa do atual (cancelador de 2 pulsos) e exibe a magnitude do log do IDFT do resultado como um gráfico de distância vs tempo.

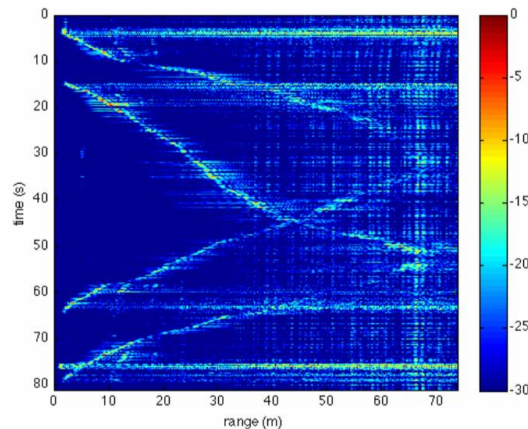
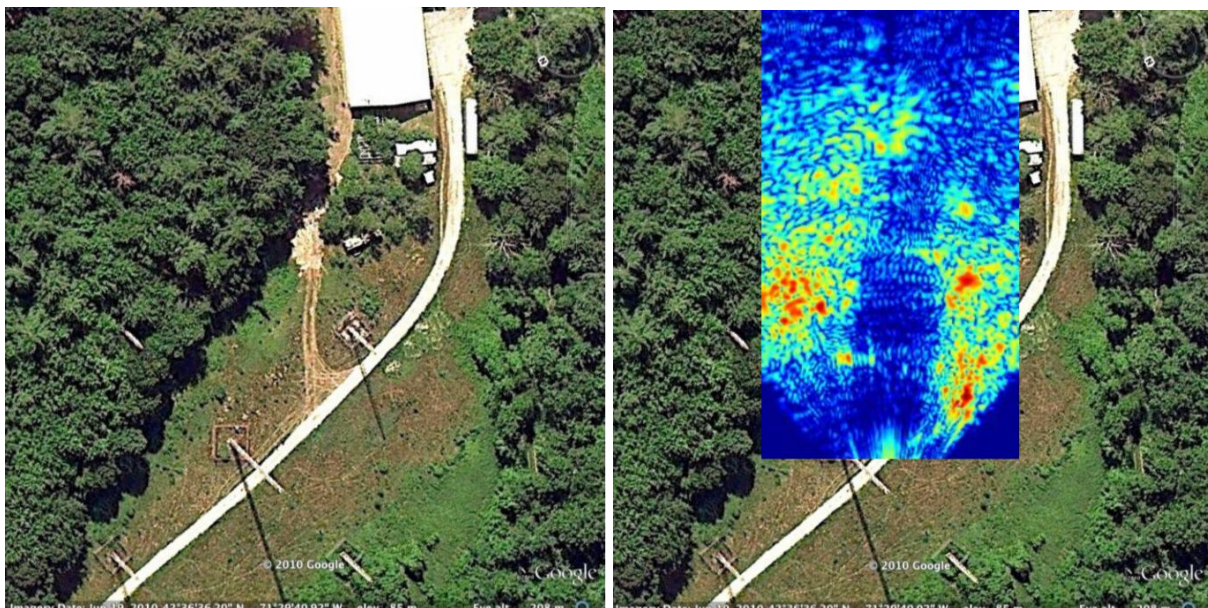


Figura 5.9 – Imagem obtida usando read-data-RTI.m.(Charvat, Gregory et al., 2011)

Assim, grave .wav continuamente, adquira perfis de alcance a 2, incremento de 8 a 10' de comprimento da abertura, então use a chave seletora para o canal L sync em branco, indicando a mudança na posição do radar.

Use SBAND-RMA-opendata.m(código disponibilizado em (Charvat, Gregory et al., 2011)) para processar o arquivo .wav e transformá-lo na imagem SAR, procurando falhas nos pulsos de sincronização indicando a nova posição do radar.



## 6 PRINCIPAIS RADARES DE ABERTURA SINTÉTICA

### 6.1 RADARSAT-1

Desenvolvido pelo governo canadense, o RADARSAT-1 foi lançado em órbita no ano de 1995, sendo este portador de um radar SAR destinado ao monitoramento terrestre. Desse modo, o RADARSAT-1 contribuiu com várias entidades científicas durante seu período de funcionamento. As aplicações do RADARSAT-1 são vastas, visto que este é um mecanismo capaz de providenciar imagens de alta resolução. Assim, temos que suas principais funcionalidades são o monitoramento do relevo, monitoramento de recursos hídricos e superficiais.

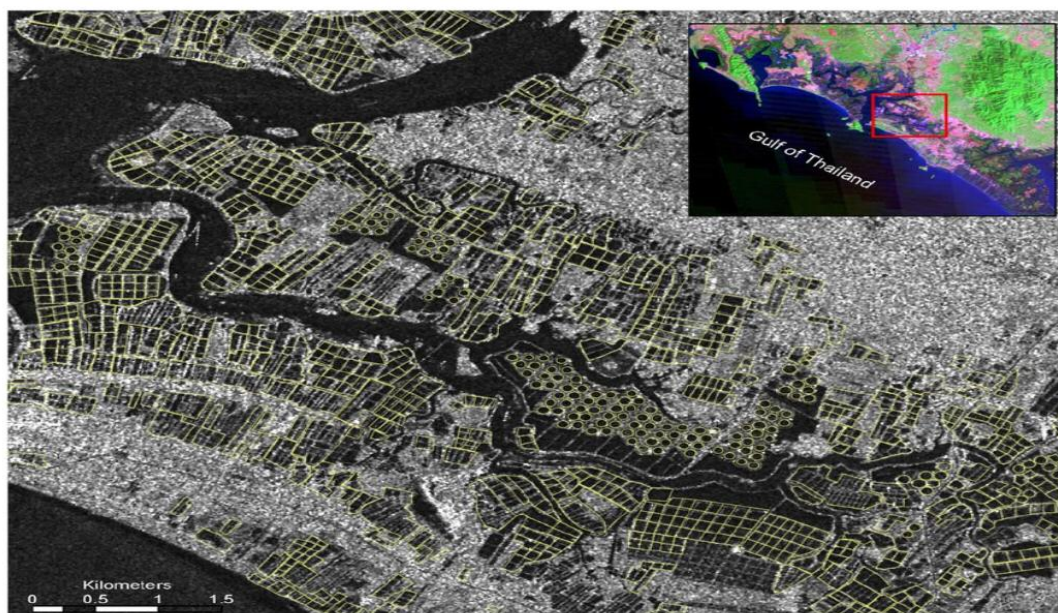


Figura 6.1 – Imagem obtida do RADARSAT-1

#### 6.1.1 Características

O RADARSAT-1 carrega em órbita um radar de abertura sintética (SAR), operando na banda C (5,6cm), que lhe confere tais habilidades de monitoramento terrestre, transmitindo imagens de alta qualidade em quaisquer condições temporais. Assim, temos que este mecanismo levado a bordo é considerado uma antena de tamanho pequeno, mas que sintetiza uma antena de centenas de metros. Desse modo, temos que este processo de sintetização é feito usando a movimentação do satélite, ao longo da linha de vôo, obtendo diversas posições sucessivas da antena e por meio de uma técnica de processamento de sinais tornam-se elementos de uma única antena longa.

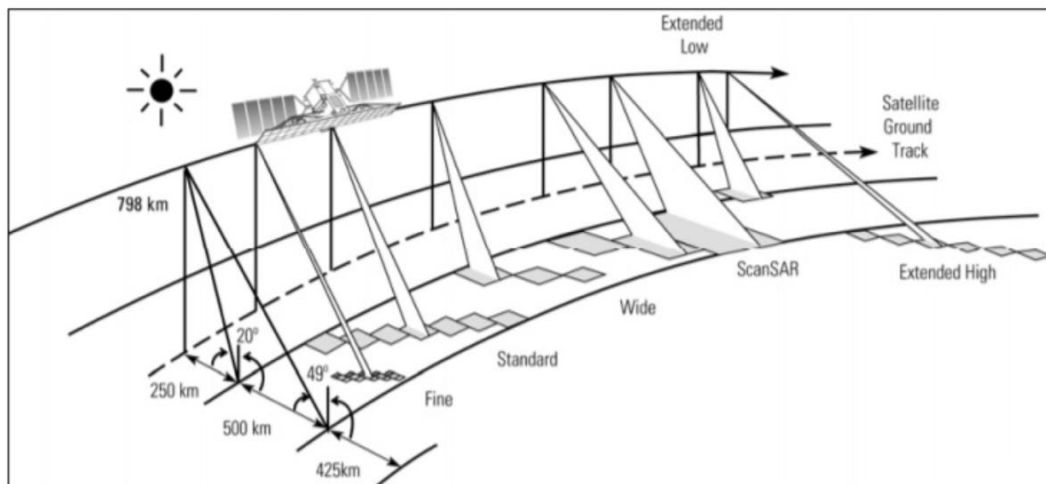
Ademais, O SAR carregado é considerado um sensor ativo, pois possui uma fonte de radiação eletromagnética artificial, que emite pulsos eletromagnéticos em uma determi-

nada banda a fim de obter imagens da superfície terrestre. A instrumentação carregada no satélite destinada ao imageamento consiste em um transmissor, receptor, e um down-link de data. Desta forma, o transmissor e o receptor operam através de uma antena que direciona a energia em um pulso, sendo que este pode ser ajustado, conferindo diferentes ângulos de incidência sob a superfície, influenciando as características da imagem.(IEE CANADA, 2010)

Massa total	2.750Kg
Tamanho da antena	15m x 1,5m
Bateria	13 x 48Ah (NiCd)
Velocidade de transferência de dados	85Mb/s - 105 Mb/s
Polarização	HH
Frequência de repetição de pulso	11,6MHz, 17,3MHz ou 30MHz

Características do RADARSAT-1.(Canadian Space Agency, 2014)

### 6.1.2 Funcionamento



**Figure 1 - RADARSAT SAR Beam Modes**

Figura 6.2 – Funcionamento do RADARSAT-1(RADAR SAT INTERNATIONAL, 2004)

O radar SAR presente no RADARSAT-1 pode operar em dois modos, os quais são:

Modo de Único Feixe em que a elevação do feixe e o perfil são mantidos constantes durante a varredura. Divide-se em standard, wide, fine, extended low, extended high.

Standard: O feixe em modo standard opera entre as posições de feixe S1 e S7, com um ângulo de incidência de 20 à 49 graus. Assim, este feixe garante um imageamento sob uma grande variedade de ângulos de incidência com a garantia de uma ótima imagem.

WideBeam: É similar ao standard, porém opera com feixes de largura de 150km, diferentemente do standard, que é de 100km. Este opera entre as posições de feixe W1, W2, W3, o que lhes confere uma resolução comparável ao standard acrescentado de uma maior área imageada.

Fine Beam: O modo de feixe fino é designado para aplicações que requerem a melhor resolução espacial disponível no RADARSAT-1. Operando entre as posições F1 e F5, com um ângulo de incidência de 37 à 47 graus.

Extended High Beam: Opera entre as posições EH1 e EH6, com um ângulo de incidência de 49 à 60 graus, a qual é considerada fora da faixa de melhor ângulo de scan da antena. Assim, temos um decaimento na qualidade da imagem.

ExtendedLowBeam: Opera na posição EL1, com um ângulo de incidência de 10 à 23 graus, possuindo também um decaimento na qualidade da imagem, pois a antena opera fora da sua faixa ideal de angulação.

E tem o Modo ScanSAR em que ocorre a combinação de vários feixes únicos em sequência durante o imageamento. Sendo assim, podemos obter larguras de feixes maiores em comparação com as obtidas com um único feixe.

ScansarNarrow: O modo de scan estreito produz uma largura de feixe de aproximadamente 300km, com uma resolução espacial de 50m. Assim, temos combinações de single beam (SNA e SNB).

$$SNA = W1+W2$$

$$SNB = W2+S5+S6$$

ScansarWide: Neste modo temos a cobertura de 500km (SWA) ou 450km (SWB), para largura de feixes, com uma resolução espacial de 100m.

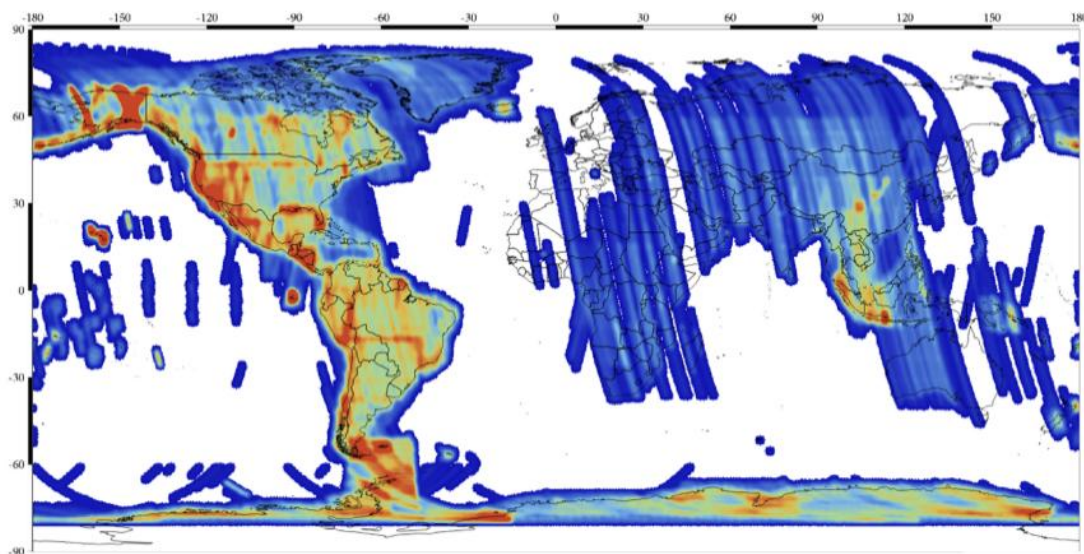
$$SWA = W1+W2+W3+S7$$

$$SWB = W1+W2+S5+S6$$

As resoluções de cena são: para o modo Standard de 24m x 27m, para o modo Fine de 6,3m até 8,4m, para o modo Wide de 33m x 27m, para o modo Extended Low de 39m x 27m e para o modo Extended High de 16m x 27m.

## 6.2 ALOS PALSAR

Este radar foi desenvolvido prioritariamente para fomentar pesquisas científicas e aplicadas na área de sensoriamento remoto e prover o Japão e países da Ásia do Pacífico com dados cartográficos que pudessem oferecer subsídios ao estudo de temas como desenvolvimento sustentável, monitoramento de desastres naturais e recursos naturais. Sendo assim, o radar entrou em órbita em 2006 e deixou de transmitir dados em 2011. (ASF, NASA e JAXA, 2006-2011) As principais características de aplicações deste radar são, cartografia de precisão, elaboração de modelos digitais de superfícies, planejamento urbano regional, monitoramento de desastres naturais, levantamento de recursos naturais, mapeamento de uso e cobertura das terras, estimativa de biomassa e, também, na extração de dados topográficos por interferometria. (Embrapa, 2013)



ALOS PALSAR Level 1.5 Fine Beam Single Polarization (FBS) Data Coverage



ALOS PALSAR Global Radar Imagery, 2006-2011

Map shows the total of ALOS PALSAR Level 1.5 Fine Beam Single Polarization (FBS) product coverage in the ASF archive

ALOS-PALSAR data are open access and can be downloaded using ASF's Vertex data portal [vertex.daac.asf.alaska.edu]

Figura 6.3 – Imagem de cobertura de dados de polarização única de feixe fino feito pelo radar Alos Palsar. (ASF, NASA e JAXA, 2006-2011)

### 6.2.1 Características

Como todos radares de abertura sintética, Alos Palsar, também, possui suas características específicas. Estas que podem ser observadas na tabela abaixo.

Massa total	4.000Kg
Tamanho da antena	n/a
Bateria	7KW na LEO
Velocidade de transferência de dados	120Mb/s - 240Mb/s
Polarização	HH, VV, HV e VH
Frequência de repetição de pulso	1500Hz - 2500Hz

Características do Alos Palsar.(Ake Rosenqvist, Masanobu Shimada and Manabu Watanabe, 2004)

### 6.2.2 Funcionamento

Três sensores estiveram a bordo do ALOS: o radiômetro PRISM (Panchromatic RemoteSensing Instrument for Stereo Mapping) capaz de adquirir imagens tridimensionais detalhadas da superfície terrestre; o radiômetro multiespectral AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer-type 2) voltado aos mapeamentos de uso e cobertura das terras e o sensor de micro-ondas PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) capaz de obter imagens diurnas e noturnas sem a interferência de nebulosidade.(Embrapa, 2013) Deste modo, tais sensores possui quatro canais espectrais que atuam em uma frequência de 1270Mhz com um comprimento de onda de banda L (15cm 30 cm).

Fine: single, possui um ângulo de visada 8°- 60°, opera com polarizações HH ou VV, com uma resolução espacial de 7 44m, e nos fornece uma área imageada de 40 70 Km.

Fine: dual, possui o mesmo ângulo de visada do Fine Single, opera com polarização HH+HV ou VV+VH, com uma resolução espacial de 14 88m, e nos fornece uma área imageada de 40 70KM.

ScanSAR: possui um Ângulo de visada de 18° - 43°, opera com polarização HH ou VV, com uma resolução espacial de 100m, e nos fornece uma área imageada de 250 350Km.

Polarimetrio: possui um ângulo de visada de 8° - 30°, opera com polarização HH+HV+VH+VV, com uma resolução espacial 24 89m, e nos fornece uma área imageada de 20 65Km.

Ademais, todos os sensores possuem a mesma resolução espacial (tempo de revista) que é de 46 dias e possuem uma resolução radiométrica de 5bits. (Embrapa, 2013)

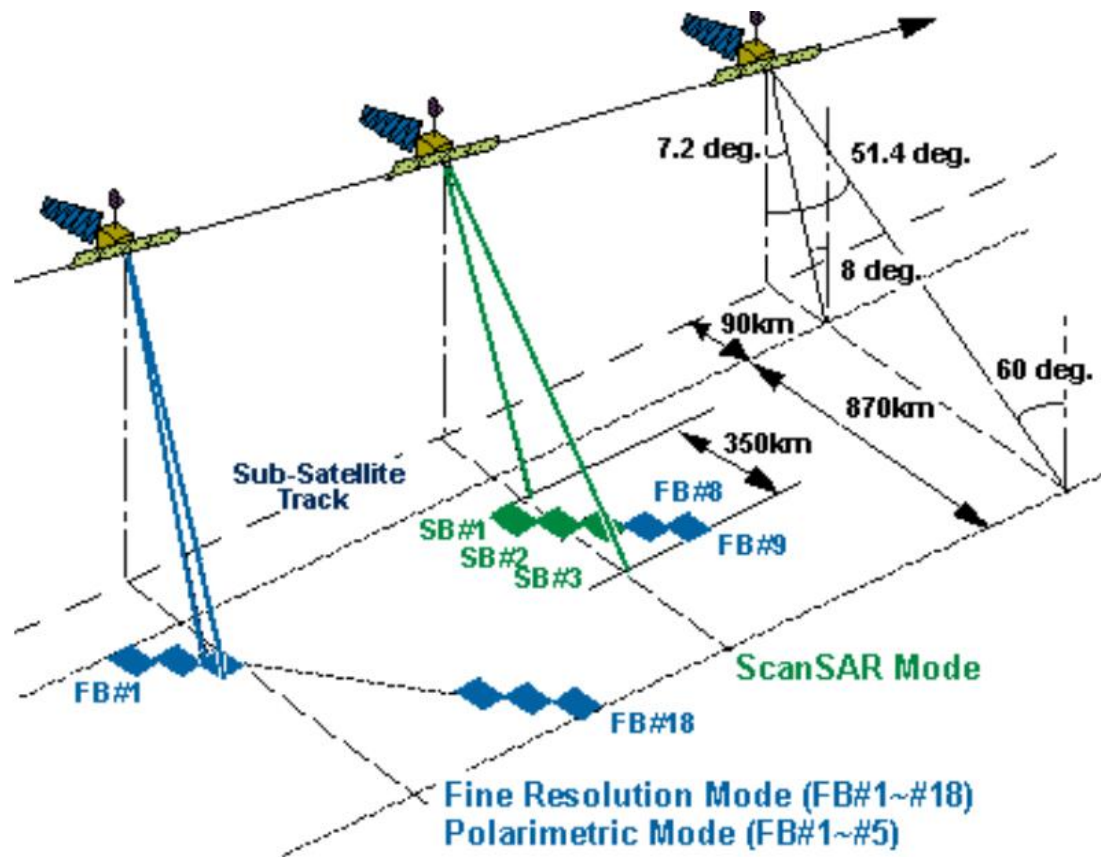


Figura 6.4 – Exemplifica a atuação dos canais espectrais submetidos às suas características específicas. (ASF, NASA e JAXA, 2006-2011)

### 6.3 TERRASAR-X

O TerraSAR-X é um satélite radar de visada lateral, lançado em 2007 na órbita LEO (514km), com a capacidade de obter imagens de alta qualidade com definição de até 1 metro, independentemente das condições meteorológicas em que se encontra ou da iluminação solar pelo fato de ser um sistema ativo (SAR). Mesmo que tenha sido projetado com vida útil de 5 anos, é aplicado ainda hoje nas áreas de segurança, topografia, agricultura de precisão, monitoramento da cobertura florestal e geologia.

#### 6.3.1 Características

Massa total	1.230Kg
Tamanho da antena	4,78m x 0,7m
Bateria	800W na LEO
Velocidade de transferência de dados	300Mb/s
Polarização	HH, VV, HV e VH
Frequência de repetição de pulso	9,65GHz

Características do TerraSAR-X. (Herbert J. Kramer, 2002)

### 6.3.2 Funcionamento

Dispondo da tecnologia Tracking Occultation and Ranging Experiment (TOR), um GPS de dupla frequência com uma unidade refletora, e com um terminal de comunicação à laser (LCT), o satélite potencializa seu funcionamento, diminuindo o erro e aumentando a precisão.(Embrapa , 2013)

O TerraSAR-X também utiliza técnicas interferométricas para produção de modelos digitais de elevação e dispõe de um sensor radar que utiliza banda X, em alta frequência (9.6 GHz) é capaz de operar em várias faixas do espectro magnético, usando as modalidades StripMap (SM), ScanSAR (SC), SpotLight (SL) e High-Resolution SpotLight (HS).

O modo ScanSAR é usado para obtenção de imagens de grandes áreas, com resolução espacial mais baixa, de 16 a 18 metros. As imagens captadas em modo StripMap alcançam 3 metros de resolução espacial. Já o modo SpotLight fornece imagens que alcançam de 1 a 2 metros de resolução espacial. A melhor resolução espacial fornecida pelo sensor (1 metro) é no modo High-Resolution SpotLight (HS).(EngeSat, 2007)

Dimensões de cena são: para o modo High-Resolution SpotLight de 4 km x 3.7 km, para o modo SpotLight de 5 até 10 km x 10km, para o modo StripMap de 30 km x 50 km e para o modo ScanSAR de 100 km x 150 km.

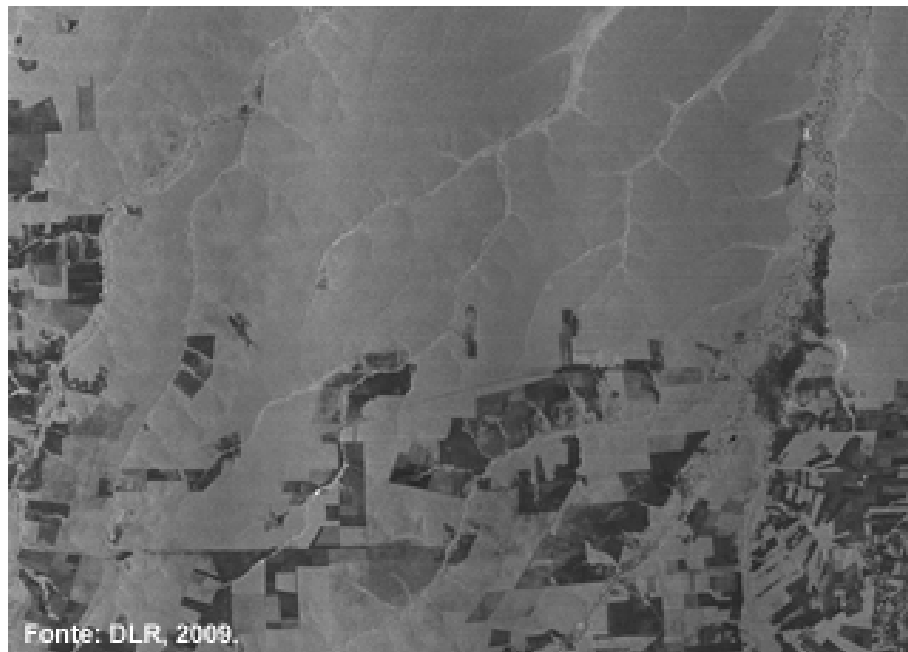


Figura 6.5 – Imagem TerraSAR-X, modo ScanSAR, Mato Grosso, Brasil.(Embrapa , 2013)

O TerraSAR-X foi construído de forma compacta. O feixe de radar pode ser inclinado entre 20 a 60 graus, perpendicularmente ao voo (visada lateral). Sendo capaz de combinar imagens de alta resolução com grandes detalhes a partir do zoom (modo High-Resolution SpotLight ou SpotLight).(Isadora Braga Cortes, Júlia Martins Vale Araújo, Thalita Baptista Mansano Peres e Maria Lígia Chuerubim, 2014)



## 6.4 SENTINEL 1

Os Sentinels são um conjunto de satélites desenvolvidos pela Agência Espacial Europeia (ESA), com o propósito de enviar um montante de imagens e dados para o programa Copernicus (antes conhecido como GMES, é uma iniciativa para operações de informações a respeito do meio ambiente e da segurança mundial) da Comissão Europeia (EC) pelo Observatório Europeu de Radares. Cada Sentinel é constituído por dois satélites (A e B) que compartilham a mesma órbita, operando em conjunto com o propósito de aumentar o número de dados coletados. O lançamento da primeira parte (Sentinel 1A) foi realizado em Abril de 2014, já sua segunda parte foi lançada apenas em Abril de 2016. Espera-se que cada satélite SENTINEL-1 transmita dados de observação da Terra por pelo menos 7 anos e tenha combustível a bordo por 12 anos. Suas principais aplicações são: monitoramento do meio terrestre por meio da cobertura florestal e de áreas agrícolas, deslizamentos de terra, cartografia de apoio e atividades de ajuda humanitária, além do monitoramento do meio marítimo em situações tais como a segurança marítima, derrames de petróleo, zonas de gelo no mar e alterações climáticas.(DGTerritório, 2017)

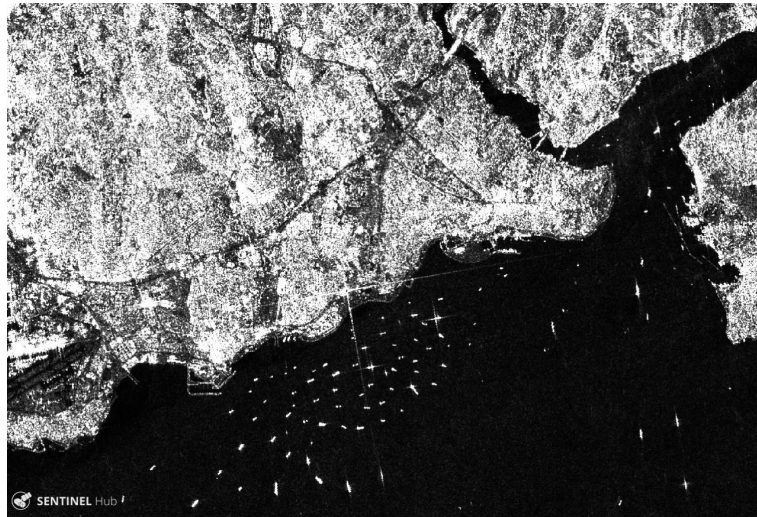


Figura 6.6 – Imageamento feito pelo Sentinel-1 no sudoeste de Istanbul.(Sentinel Hub, 2014)

### 6.4.1 Características

Peso	2.300Kg
Tamanho da antena	12m x 0,821m
Polarização	HH+HV, VV+VH, VV, HH
Frequência de repetição de pulso	1000 a 3000 Hz

### 6.4.2 Funcionamento

Os radares podem ser classificados de forma mais simples por ativos, aqueles que emitem suas próprias ondas eletromagnéticas, e passivos, aqueles que apenas interpretam as ondas eletromagnéticas emitidas pelo Sol que refletem no objeto. O grande ponto vantajoso do sistema ativo é a sua independência das condições climáticas, justamente pelo fato de ser sua própria fonte eletromagnética.

Para obter uma imagem de melhor resolução espacial, seria necessário implantar uma antena de centenas de metros, além de manter o radar circulando em uma linha de voo relativamente próxima à superfície, o que é inviável. Para solucionar tal problema, a tecnologia dos radares de abertura real (RAR) foi modificada e melhorada, gerando assim os radares de abertura sintética (SAR). Esses, que são a tecnologia utilizada atualmente, dispõem de uma antena relativamente pequena (de alguns metros apenas), mas que sintetiza, por meio de uma operação um tanto quanto complexa, uma antena de centena de metros. Em curtos detalhes, o radar percorre a linha de voo estabelecida, emitindo uma série de feixes consecutivos e, posteriormente, os une em uma matriz de antenas, simulando ser uma única grande antena. Isso só acontece graças a diversas operações matemática que analisam a intensidade do feixe de retorno, deduzindo a posição do objeto capturado em um look, e assim, comparando com as posições presentes em outros looks, determinando por fim a posição real do objeto capturado.(MENESES; ALMEIDA, 2012) A imagem a seguir ilustra o processo de sintetização da matriz de antenas:

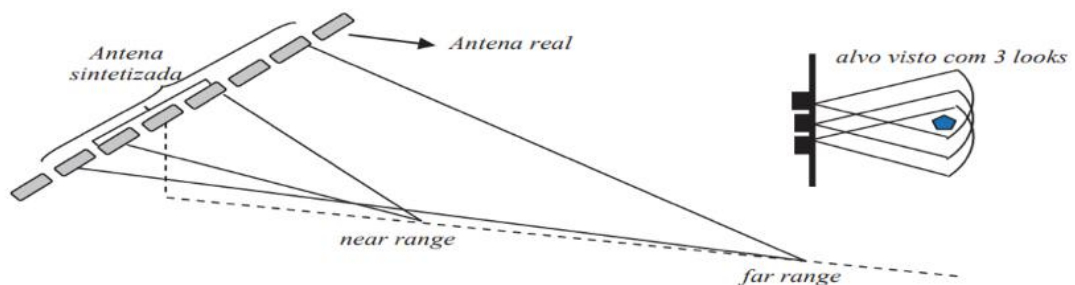


Figura 6.7 – Descrição da captura de um alvo a partir de múltiplos feixes.(MENESES; ALMEIDA, 2012)

Como todo SAR, o Sentinel-1 é um radar ativo e seus feixes podem ser descritos através de uma banda (faixa espectral) e seus ângulos de incidência. Tais características são extremamente importantes para a resolução da imagem e o tipo de superfície adotada para a leitura. O Sentinel-1 é um radar de banda C (frequência aproximada de 5.405 GHz) de visada lateral direita, com quatro exclusivos modos de imageamento, resolução (abaixo de 5m) e cobertura (acima de 400km), além de ter capacidade de memória de 1.410 Gb. (ESA, 2019)

Seus quatro modos de imageamento podem ser definidos como:

**Stripmap Mode:** Através deste modo, o radar oferece uma cobertura com resolução 5m por uma faixa de 80 km. Seis faixas sobrepostas são capazes de cobrir uma superfície de 375km. Para cada faixa, a antena é configurada para gerar um feixe com azimute e elevação fixos. A elevação da formação do feixe é aplicada de forma que suprime a

ambiguidade de faixas. O modo Stripmap será operado somente mediante solicitação em situações extraordinárias.

**Interferometric Wide Swath Mode:** Este modo permite combinar uma faixa grande (250 km) com uma resolução geométrica moderada (5m a 20m). O modo IW utiliza três sub-faixas usando a Observação de Terreno de Varredura Progressiva (TOPSAR). Com a técnica TOPSAR, além de direcionar o feixe no alcance, como no SCANSAR, o feixe também é eletronicamente guiado de trás para frente na direção do azimute para cada rajada (alterando-se os ângulo de visada e depressão), evitando recortes e resultando em uma imagem de maior qualidade. A interferometria é garantida pela sobreposição suficiente do espectro Doppler (no domínio azimute) e do espectro do número de ondas (no domínio da elevação). A técnica TOPSAR garante qualidade de imagem homogênea em toda a faixa. Este é o modo de imageamento mais utilizado.(ESA, 2019)

**Extra Wide Swath Mode:** Este modo, capaz de realizar a cobertura de uma faixa extra larga (400km), é destinado a serviços operacionais marítimos, de gelo e de zona polar, onde são exigidas ampla cobertura e curtos tempos de revisão. O modo EW funciona de maneira semelhante ao modo IW, empregando uma técnica TOPSAR usando cinco sub-faixas em vez de três, resultando em uma resolução mais baixa (20m a 40m).

**Wave Mode:** Neste modo, as imagens são capturadas singularmente de forma similar ao modo Stripmap (porém com cobertura de apenas 20km) e adquiridas em dois ângulos de incidência diferentes (23° e 36,5°) alternando-se de 100km em 100km. Desta forma, esse modo registra uma faixa de 20km com inclinação de 23°, após 100km registra uma faixa de 20km com inclinação de 36,5° e, após 100km registra novamente uma faixa de 20km com inclinação de 23°.(ESA, 2019)

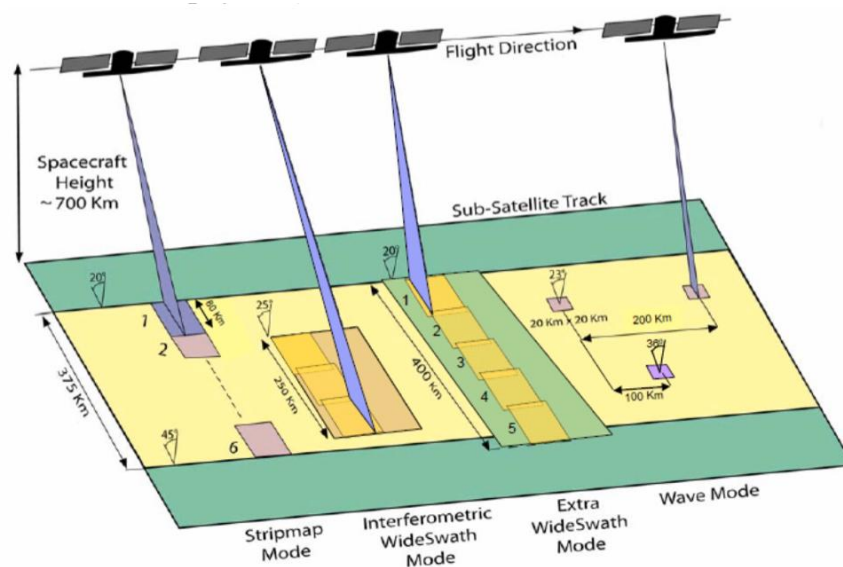


Figura 6.8 – Ilustração dos modos de imageamento do Sentinel-1(ESA, 2019)

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ake Rosenqvist, Masanobu Shimada and Manabu Watanabe. **ALOS PALSAR: Technical outline and mission concepts**. 2004. Acessado em 08 set 2019. Disponível em: <[https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/kyoto/ref/ALOS\\_BioGeo-04.pdf](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/kyoto/ref/ALOS_BioGeo-04.pdf)>.

ASF, NASA e JAXA. **ALOS PALSAR Global Radar Imagery**. 2006–2011. Acessado em 09 set 2019. Disponível em: <<https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>>.

Canadian Space Agency. **RADARSAT-1**. 2014. Acessado em 08 set 2019. Disponível em: <<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat1>>.

Charvat, Gregory et al. **Build a Small Radar System Capable of Sensing Range, Doppler, and Synthetic Aperture Radar Imaging**. 2011. Acessado em 08 set 2019. Disponível em: <<https://ocw.mit.edu/resources/res-ll-003-build-a-small-radar-system-capable-of-sensing-range-doppler-and-synthetic-aperture-radar/>>.

DGTerritório. **Breve descrição dos Satélites Sentinel**. 2017. Acessado em 08 set 2019. Disponível em: <[http://www.dgterritorio.pt/cartografia\\_e\\_geodesia/cartografia/detecao\\_remota/copernicus/componente\\_espaco/breve\\_descricao\\_dos\\_satelites\\_sentinel/](http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/detecao_remota/copernicus/componente_espaco/breve_descricao_dos_satelites_sentinel/)>.

Embrapa . **Terrasar-x**. 2013. Acessado em 08 set 2019. Disponível em: <[https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao\\_terrasarx.html](https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_terrasarx.html)>.

Embrapa. **ALOS - Advanced Land Observing Satellite**. 2013. Acessado em 04 set 2019. Disponível em: <[https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao\\_alos.html](https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_alos.html)>.

Encyclopedia Britannica. **History of Radar**. 2019. Acessado em 25 out 2019. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/radar/History-of-radar>>.

EngeSat. **TerraSAR-X**. 2007. Acessado em 28 ago 2019. Disponível em: <<http://www.engesat.com.br/imagem-de-satelite/terrasar-x/>>.

Erika Pitella. **UWB Radar System for Breath Activity Monitoring - Scientific Figure**. 2019. Acessado em 31 out 2019. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/figure/Radar-slant-range-and-ground-range\\_fig8\\_236970713](https://www.researchgate.net/figure/Radar-slant-range-and-ground-range_fig8_236970713)>.

ESA. **SENTINEL-1 Overview**. 2019. Acessado em 10 set 2019. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview>>.

European Space Agency. **InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation**. 2007. Acessado em 23 set 2019. Disponível em: <[http://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19\\_ptA.pdf](http://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf)>.

Herbert J. Kramer. **TSX (TerraSAR-X) Mission**. 2002. Acessado em 08 set 2019. Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/t/terrasar-x>>.

IEE CANADA. **Radarsat**. 2010. Acessado em 10 set 2019. Disponível em: <[https://www.ieee.ca/millennium/radarsat/radarsat\\_about.html](https://www.ieee.ca/millennium/radarsat/radarsat_about.html)>.

Inpe. **Teoria : Sistemas de Radar**. 2019. Acessado em 31 out 2019. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/radar/radar.htm>>.

Isadora Braga Cortes, Júlia Martins Vale Araújo, Thalita Baptista Mansano Peres e Maria Lígia Chuerubim. **SISTEMA DE FUNCIONAMENTO E APLICAÇÃO DO SATÉLITE ALEMÃO TERRASAR-X**. 2014. Acessado em 08 nov 2018. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/308698194\\_SISTEMA\\_DE\\_FUNCIONAMENTO\\_E\\_APLICACOESDO\\_SATELITE\\_ALEMAO\\_TERRASAR-X](https://www.researchgate.net/publication/308698194_SISTEMA_DE_FUNCIONAMENTO_E_APLICACOESDO_SATELITE_ALEMAO_TERRASAR-X)>.

MENESES, P.; ALMEIDA, T. **INTRODUÇÃO AO PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO**. [S.l.: s.n.], 2012.

RADAR SAT INTERNATIONAL. **RADARSAT-1**. 2004. Acessado em 08 set 2019. Disponível em: <[https://mdacorporation.com/docs/default-source/product-spec-sheets/geospatial-services/r1\\_prod\\_spec.pdf?sfvrsn=6](https://mdacorporation.com/docs/default-source/product-spec-sheets/geospatial-services/r1_prod_spec.pdf?sfvrsn=6)>.

Sentinel Hub. **Sentinel Image**. 2014. Acessado em 23 set 2019. Disponível em: <[https://miro.medium.com/max/2566/1\\*zS1VNlfpNXGV6Roz611cGA.jpeg](https://miro.medium.com/max/2566/1*zS1VNlfpNXGV6Roz611cGA.jpeg)>.

SKOLNIK, M. I. **Radar Handbook**. [S.l.: s.n.], 2008.

SMITH, S. W. **Digital Signal Processing A Practical Guide for Engineers and Scientists**. [S.l.: s.n.], 2003.

Sophia. **Deteção Remota: Aplicação de Imagens de Radar de Abertura Sintética**. 2015. Acessado em 25 out 2019. Disponível em: <[https://www.sophia-mar.pt/pt/recursos\\_pedagogicos/2](https://www.sophia-mar.pt/pt/recursos_pedagogicos/2)>.

TutorialsPoint. **Radar Systems - FMCW Radar**. 2019. Acessado em 10 nov 2019. Disponível em: <[https://www.tutorialspoint.com/radar\\_systems/radar\\_systems\\_fmcw\\_radar.htm](https://www.tutorialspoint.com/radar_systems/radar_systems_fmcw_radar.htm)>.