



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ELECTRÓNICA E  
TELECOMUNICAÇÕES E DE COMPUTADORES**

**VIGILÂNCIA DA COSTA MARÍTIMA  
UTILIZANDO RADAR  
DE ABERTURA SINTÉTICA**

**DUARTE MIGUEL FUSCO CARONA  
(BACHAREL)**

**DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM ENGENHARIA DE SISTEMAS DAS TELECOMUNICAÇÕES E  
ELECTRONICA**

**ORIENTADOR:**  
Doutor Paulo Alexandre Carapinha Marques

**JÚRI:**  
Doutor Andrea Raditus

**OUTUBRO 2008**



## Resumo

Nesta tese apresenta-se uma nova técnica para solucionar a problemática da estimação de velocidade de embarcações em Radar de Abertura Sintética (SAR). A solução proposta combina duas técnicas já publicadas introduzindo como inovação, a Transformada de Radon. Esta transformada vai permitir estimar a posição do rasto que a embarcação gera à medida que se vai deslocando. Com a posição do objecto calculada é então possível estimar a sua distância ao rasto e assim a velocidade em *range*. Esta estimativa é limitada pelo *Pulse Repetition Frequency* (PRF) utilizado na missão SAR. Para a velocidade em azimute é usada uma técnica de *Multilook* que vai executar uma correlação cruzada entre dois *look's* consecutivos. Esta operação permite estimar o desvio que um alvo sofreu de um *look* para outro. Medindo a frequência central de cada *look* utilizado é possível estimar a velocidade em azimute.

**Palavras-chave:** Radar de Abertura Sintética, estimação de velocidade em range e azimute, Transformada de Radon, *Multilook*,



## Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer aos meus pais, irmão e namorada que ao longo do curso e da minha vida académica me apoiaram e me deram a motivação para avançar sempre que necessitei.

Gostaria ainda de agradecer ao meu orientador o Professor Paulo Marques que se mostrou disponível para ajudar, dar uns “empurrões” sempre que necessitei e para dar sugestões para o bom desenvolvimento desta tese, por isto e muito mais um muito obrigado.

Agora queria agradecer ao meu colega Eng. Adérito Cardoso que lutou e batalhou ao meu lado para que as nossas teses chegassem ao ponto a que chegaram. Queria ainda agradecer aos meus outros dois colegas que completam o mítico *Funtastic Four*, o Eng. Pedro Serralha e o Eng. Filipe Mesquita que foram os meus colegas e amigos ao longo desta maratona que foi o curso. Obrigado por aturarem algumas das minhas teimosias.

Não queria deixar ainda de referir todos os outros colegas que foram igualmente importantes, no entanto, enumerar os seus nomes poderia ser demasiado exaustivo e correria o risco de esquecer-me de alguém, o que seria injusto.



## Índice de matérias

Resumo .....	3
Agradecimentos .....	5
Índice de matérias .....	7
Índice de Tabelas .....	9
Índice de figuras .....	11
Acrónimos .....	15
Notação .....	17
Capítulo 1 .....	19
1. Introdução .....	19
Capítulo 2 .....	21
2. Radar de Abertura Sintética.....	21
2.1. Radar Abertura Sintética.....	21
2.1.1. Condições Atmosféricas .....	23
2.1.2. Tipos de reflexão .....	23
2.1.3. Modos de operação do Radar .....	24
2.1.4. Interferência.....	26
2.2. Processamento de sinal .....	28
2.2.1. Processamento em Distância .....	30
2.2.1.1. Chirp .....	30
2.2.1.2. Sinal recebido .....	32
2.2.1.3. Compressão de impulso .....	33
2.2.1.4. Estimação da reflectividade .....	34
2.2.1.5. Resolução em distância.....	35
2.2.2. Processamento em azimute.....	36
2.2.3. Formação de imagem.....	39
2.3. Problemas na formação de imagem .....	40
2.3.1. Tipos de distorção.....	40
2.3.2. Alvos móveis .....	41
Capítulo 3 .....	43
3. Simulador .....	43
3.1. Introdução .....	43
3.2. Simulação no domínio temporal .....	44

3.2.1.	Dados Brutos (RawData).....	44
3.2.2.	Compressão em distância e azimute.....	45
3.3.	Simulação no domínio da frequência.....	46
3.3.1.	Dados Brutos (RawData).....	46
3.3.2.	Compressão em distância e azimute.....	47
3.4.	Alvos móveis.....	48
Capítulo 4	.....	51
4.	Estado da arte.....	51
4.1.	Introdução.....	51
4.2.	Técnicas de Detecção e estimação de velocidade de embarcações.....	52
Capítulo 5	.....	57
5.	Abordagem Proposta.....	57
5.1.	Introdução.....	57
5.2.	Detecção de alvos.....	58
5.3.	Estimação da Velocidade.....	59
5.3.1.	Azimute.....	59
5.3.1.1.	Geração das Sub-Imagens.....	59
5.3.1.2.	Processo de cálculo da velocidade.....	60
5.3.2.	Range.....	61
5.4.	Resultados.....	64
5.4.1.	Velocidade em Range.....	68
Simulação 1:	.....	70
Simulação 2:	.....	72
Simulação 3:	.....	74
5.4.2.	Velocidade em Azimute.....	78
Capítulo 6	.....	83
6.	Conclusão.....	83
6.1.	Trabalho Futuro.....	85
Apêndice A	.....	87
A.	Transformada de Radon.....	87
Bibliografia	.....	89

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros da plataforma.....	44
Tabela 2 - Parâmetros do <i>Chirp</i> .....	44
Tabela 3 - Parâmetros de simulação .....	69
Tabela 4 - Velocidades estimadas .....	77
Tabela 5 - Velocidades estimadas em azimute.....	82



## Índice de figuras

Figura 1 – Geometria de aquisição do Radar [extraído de [5]] .....	22
Figura 2 - Esquema da Abertura Sintética [extraído de [5]].....	22
Figura 3 - Tipos de Reflexão [extraído de [20]].....	23
Figura 4 - Stripmap SAR [extraído de [12]].....	24
Figura 5 - Spotlight SAR [extraído de [12]].....	25
Figura 6 - Scan SAR [extraído de [21]].....	26
Figura 7 - Efeito "sal e pimenta" [extraído de [12]] .....	27
Figura 8 - Interferências (Construtiva e Destrutiva) [extraído de [12]] .....	27
Figura 9 - Esquema de processamento do SAR .....	28
Figura 10 - <i>Chirp</i> em banda de base.....	31
Figura 11 - Obstáculo centrado em R e comprimento W [extraído de [3]].....	32
Figura 12 - Desmodulador em fase e quadratura [extraído de [3]] .....	33
Figura 13 - Comparação entre reflectividade ideal e real.....	36
Figura 14 - Geometria de estudo para processamento em azimute .....	37
Figura 15 - <i>Chirp</i> em azimute .....	37
Figura 16 - Tipos de distorção[extraído de [5]].....	41
Figura 17 - Efeitos da velocidade nas imagens [extraído de [3]] .....	41
Figura 18 - Imagem processada no simulador.....	43
Figura 19 - Dados Brutos .....	44
Figura 20 - Compressão em distância .....	45
Figura 21 - Compressão em azimute .....	45
Figura 22 - Dados Brutos FFT.....	46
Figura 23 - Compressão em distância FFT.....	47
Figura 24 -Compressão em azimute FFT .....	47
Figura 25 - Dados brutos gerados de um alvo com ambas as velocidades.....	48
Figura 26 - Imagem reconstruída de um alvo com ambas as velocidades .....	48
Figura 27 - Processo de formação de imagem no simulador.....	49
Figura 28 - Processo de detecção de alvos móveis [extraído de [23]] .....	55
Figura 29 - Correlação 2D para uma área onde não existem embarcações [adaptado de [9]] .....	58

Figura 30 - Correlação 2D para uma zona onde existe uma embarcação [adaptado de [9]] .....	58
Figura 31 - Espectro de frequência de uma sub-imagem .....	59
Figura 32 - Geometria de detecção do rasto .....	62
Figura 33 - Estrutura da Abordagem proposta .....	64
Figura 34 - Imagem simulada.....	65
Figura 35 - Dados Brutos gerados com alvo sem velocidade.....	65
Figura 36 - Compressão em Range para um alvo sem velocidade.....	66
Figura 37 - Imagem reconstruída de um alvo sem velocidade.....	66
Figura 38 - Espectro de frequência dos dados brutos na direcção de range.....	67
Figura 39 - Esquema de cálculo da velocidade em range.....	68
Figura 40 - Dados brutos - simulação 1.....	70
Figura 41 - Dados comprimidos em range – Simulação 1 .....	70
Figura 42 – Imagem reconstruída – Simulação 1 .....	71
Figura 43 - Espectro de frequência dos dados brutos com velocidade em range.....	71
Figura 44 - Dados brutos simulação 2.....	72
Figura 45 - Dados comprimidos em range - simulação 2.....	73
Figura 46 - Imagem reconstruída - simulação 2.....	73
Figura 47 - Espectro de frequência dos dados brutos - simulação 2 .....	74
Figura 48 - Dados brutos com velocidade máxima admissível – Simulação 3.....	74
Figura 49 - Dados comprimidos em range de um alvo com velocidade máxima – Simulação 3 .....	75
Figura 50 - Imagem reconstruída de um alvo com velocidade máxima – Simulação 3.....	75
Figura 51 - Espectro de frequência dos dados brutos de um alvo com velocidade máxima .....	76
Figura 52 - Esquema de estimação da velocidade em azimute .....	78
Figura 53 - Imagem reconstruída.....	79
Figura 54 - Sub-imagem gerada 1 .....	79
Figura 55 - Sub-imagem gerada 2 .....	80
Figura 56 - Sub-imagem gerada 3 .....	80
Figura 57 - Sub-imagem gerada 4 .....	80
Figura 58 - Correlação Cruzada 2D.....	81
Figura 59 - Espectro da frequência de uma sub-imagem .....	81

Figura 60 - Transformada de Radon, extraído de [25] ..... 88



## **Acrónimos**

<b>CCC</b>	<i>Cross Correlation Coefficient</i>
<b>CCF</b>	<i>Cross Correlation Function</i>
<b>FM</b>	<i>Frequency Modulation</i>
<b>FFT</b>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<b>ISAR</b>	<i>Inverse Synthetic Aperture Radar</i>
<b>LB</b>	Largura de Banda
<b>MAD</b>	<i>Mean Absolute Difference</i>
<b>MSE</b>	<i>Mean Square Error</i>
<b>NCCF</b>	<i>Cross Correlation Coefficient Function</i>
<b>PRF</b>	<i>Pulse Repetition Frequency</i>
<b>RADAR</b>	<i>Radio Detection and Ranging</i>
<b>SAR</b>	<i>Synthetic Aperture Radar</i>



## Notação

$\theta_{3dB}$  - Abertura real da largura de banda a 3 dB

$\beta$  - Largura de banda

$\lambda$  - Comprimento de onda

D - Diâmetro da antena

B – Dimensão da abertura sintética

$f_0$  - Frequência da portadora

$\alpha$  - Coeficiente de variação

$T_p$  - Tempo de duração do pulso enviado

$\delta_{cr}$  - Resolução em distância para o spotlight SAR

$\theta_B$  - Ângulo de abertura

$t_A$  - Tempo de abertura

$x_0$  - Posição de um alvo

$k$  - Número de onda

$c$  – Velocidade da luz

$R_0$  - Distância da plataforma ao chão

$V_{AX}$  - Velocidade da Plataforma

$f_{Li}$  - Frequência central de cada look

$\delta_x$  - Espaçamento de cada pixel na direcção de azimuth

$\delta_y$  - Espaçamento de cada pixel na direcção de range

$\bar{s}(t)$  - Sinal enviado desmodulado

$s(t)$  - Sinal enviado modulado

$\psi(x, y)$  – Desvio de fase provocado pelos alvos

$q_0(x, y)$  – Reflectividade estimada

$\hat{q}(x)$  - Correlação cruzada de  $g(x)$

$m(x, y)$  – Fracção do sinal enviado que é reflectido para o radar

$g_0(t)$  - Sinal recebido modulado

$\bar{g}(t)$  - Sinal recebido desmodulado

$h_r(x)$  - Resposta impulsiva do filtro adaptado

$\rho(t)$  – Autocorrelação

$w_a(y - y_0)$  - Função diagrama de radiação da antena

$r_1(R, y - y_0)$  - Distância que vai da antena a um ponto reflector localizado em  $(R, y)$

$\Delta y$  - Resolução em azimute

$\Delta x$  - Vector deslocamento em azimute

$\Delta t$  - Diferença de tempo entre duas sub-imagens consecutivas

$V_{tx_{ext}}$  - Velocidade na direcção de azimute

$\Delta a$  - Distancia do alvo móvel à sua rota

$V_{r_{max}}$  - Velocidade máxima admissível em range

$sinc(x)$  - Função *sinc*, definida como  $sinc(x) \triangleq \frac{\sin(x)}{x}$

$rect(x)$  - Função rectangular

$R(t)$  – Distancia da plataforma ao alvo

# Capítulo 1

## 1. Introdução

O termo radar foi criado em 1941 como acrónimo para *Radio Detection and Ranging*. Este termo designa um sistema que usa ondas electromagnéticas para detectar alvos e estimar a sua altitude, direcção ou velocidade tais como aviões, embarcações, veículos a motor ou formações de terreno. O termo radar foi criado em 1941 como acrónimo para *Radio Detection and Ranging*.

Um sistema de radar possui um transmissor que emite ondas rádio, que são reflectidas pelos alvos. Estas reflexões são posteriormente detectadas por um receptor, que tipicamente está localizado junto do emissor. De notar que os sinais retornados são geralmente muito fracos, mas como são sinais rádio são facilmente amplificados devido ao facto de se utilizar um sinal *chirp* no envio. Esta propriedade permite ao radar detectar alvos a distancias que outros sistemas não conseguem.

Mais tarde, por volta dos anos 50, apareceu o radar de abertura sintética o que levou a um grande desenvolvimento neste tipo de sistema, levando assim à criação de sistemas bastante flexíveis, que se tornou bastante útil quer em aplicações militares ou civis. Antes o radar já tinha dado mostras de ser um sistema bastante valioso pelo facto de poder fazer pesquisas quer de dia ou de noite e pela capacidade de penetrar nuvens ou chuva. Assim, o objectivo do SAR é utilizar um radar incorporado numa plataforma que se move, avião ou satélite, que vai permitir combinar os sinais reflectidos ao longo de uma direcção de voo que vai permitir sintetizar uma grande antena. Esta abertura, ou área usada para receber os sinais é criada artificialmente durante o processamento de

sinal. A abertura sintética permite ao radar obter uma resolução em azimute (direcção de deslocamento da plataforma) bastante elevada. A resolução na direcção de distância (direcção perpendicular a de voo) é determinada pela duração dos pulsos transmitidos.

Actualmente devido à melhoria do poder computacional e da consequente melhoria da performance dos algoritmos, é possível desenvolver técnicas que permitem resolver facilmente problemas que antes eram difíceis de resolver. Por exemplo o *Speckle*, que é um tipo de interferência nos sinais, produzido pela superfície e pelas características do radar, como irá ser explicado mais a frente.

Este documento aborda problemas como o descrito bem como outros que existem na formação de imagem pelo radar. Vai ser igualmente abordado outro problema existente, que é o problema da detecção e estimação de velocidade de embarcações. Vão ser descritas algumas das técnicas mais recentes que tentam resolver estas problemáticas, e depois uma delas irá ser implementada através de um simulador que foi desenvolvido no contexto deste trabalho.

# Capítulo 2

## 2. Radar de Abertura Sintética

### 2.1. Radar Abertura Sintética

Um radar de abertura sintética (SAR) é um sistema que permite construir imagens de um determinado objecto ou porção de terreno. Isto é conseguido através de uma antena de dimensões reduzidas, em que se emite uma sequência de impulsos à medida que a plataforma viaja, (e estes são enviados de volta quando reflectem nos objectos que se encontram no solo), permitindo assim construir uma imagem com elevada resolução. A antena pode estar situada quer num avião, quer num satélite. Na Figura 1 pode-se ver a geometria de aquisição do radar, sendo que na Figura 2 encontra-se a ilustração do conceito da abertura sintética.

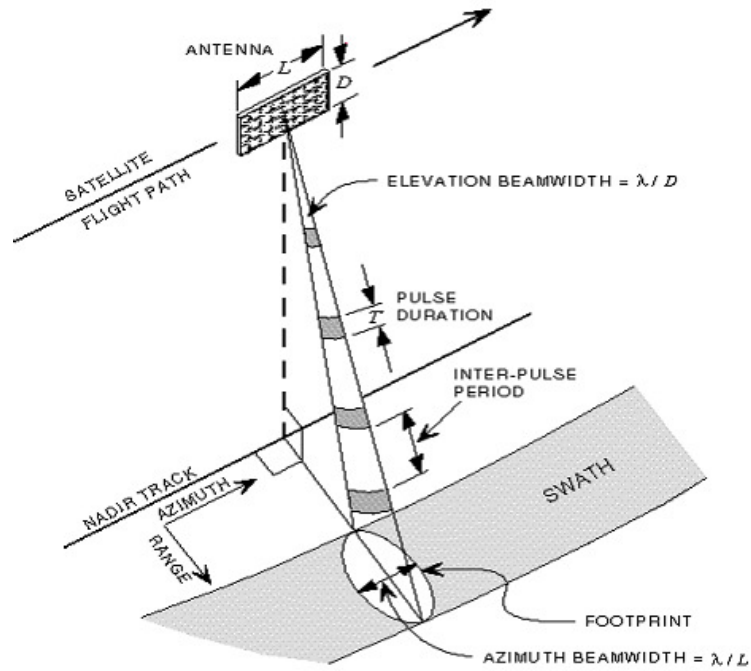


Figura 1 – Geometria de aquisição do Radar [extraído de [5]]

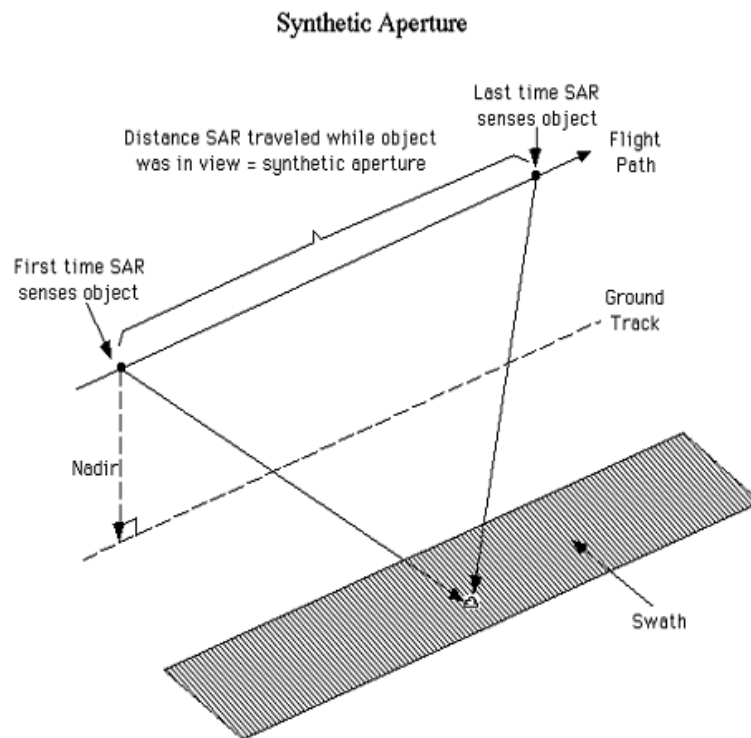


Figura 2 - Esquema da Abertura Sintética [extraído de [5]]

### 2.1.1. Condições Atmosféricas

O radar consegue operar sobre qualquer tipo de condições atmosféricas uma vez que opera com comprimentos de onda muito elevados quando comparado com o comprimento de onda das nuvens por exemplo, o que permite ultrapassar quer nuvens, chuva, ou qualquer outro tipo de fenómeno atmosférico.

### 2.1.2. Tipos de reflexão

Existem dois tipos de reflexão: a Especular e a Difusa. A reflexão especular (Figura 3) ocorre quando existe terreno ou objectos pouco pronunciados comparado com  $\lambda$ , tais como estradas, planícies, carros, etc. Isto porque os alvos reflectem a onda incidente com um ângulo igual ao de incidência. A reflexão difusa (Figura 3) verifica-se quando o terreno é muito rugoso ou possuiu muitas árvores comparado com  $\lambda$ , isto porque estas reflectem a onda incidente para todas as direcções e com todos os ângulos.

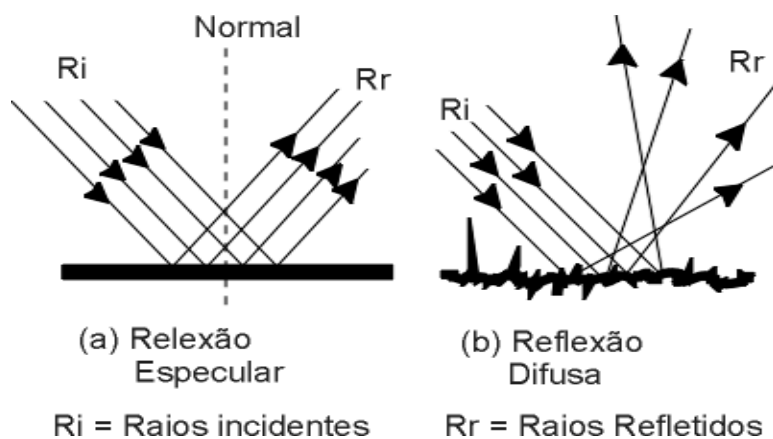


Figura 3 - Tipos de Reflexão [extraído de [20]]

### 2.1.3. Modos de operação do Radar

São 3 os modos de operação do SAR:

i) Stripmap SAR ou Strip SAR (Figura 4) que é muito utilizado na construção de imagens de áreas muito vastas. Neste modo, a antena permanece com um ângulo oblíquo constante e perpendicular à direcção de voo (direcção de azimute) do avião (tipicamente este tipo de radar é transportado por avião quando não se esta num ambiente espacial).

Normalmente, considerando-se que o radar se desloca em linha recta com velocidade constante, este vai observar continuamente uma larga fatia de terreno, paralela ao seu sentido de deslocação. O radar transmite impulsos de elevada largura de banda com intervalos regulares, armazenando os ecos correspondentes para posterior processamento. Neste modo o ângulo de abertura tem de ser igual a abertura real da largura de banda a 3 dB, correndo o risco de comprometer a resolução no solo [26]:

$$\Delta\theta \cong \theta_{3dB} \cong \frac{\beta\lambda}{D\cos\theta_{sq}} \quad (2.1)$$

Logo a resolução em distância vem [26]:

$$\delta_{cr} \cong \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \cong \frac{D\cos\theta_{sq}}{2\beta} \quad (2.2)$$

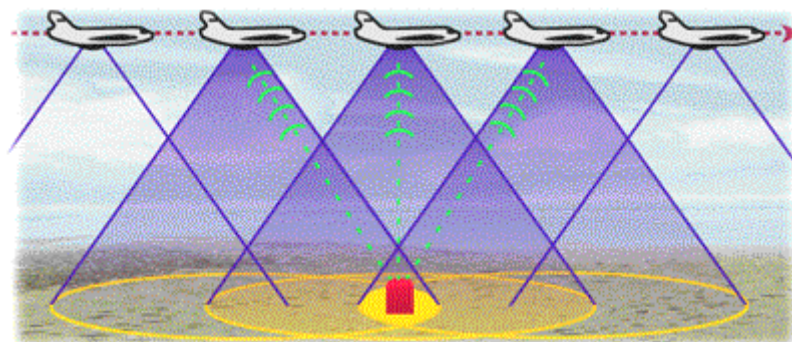


Figura 4 - Stripmap SAR [extraído de [12]]

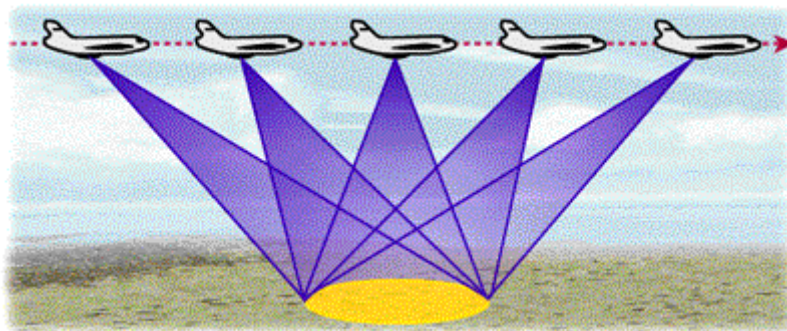
ii) Outro modo existente é o Spotlight SAR (Figura 5), que é usado para obter uma imagem de elevada resolução de uma região específica. Para isso o radar pesquisa sempre a mesma área, e à medida que o avião viaja a antena vai-se deslocando de modo a manter aquela região sempre iluminada. Assim,  $\Delta\theta$  pode ser considerado mais pequeno que  $\theta_b$  (ângulo de abertura). É de notar que a resolução em distância deste modo é menor do que a que se obtém em *stripmap*. Se a plataforma de radar seguir uma trajectória circular à volta do alvo em que este coincide com o centro do círculo, então este modo é equivalente a um ISAR. Normalmente o radar desloca-se em linha recta, mas no caso de se deslocar em círculo as correcções de fase necessárias são facilmente feitas, sendo o processamento muito idêntico ao do ISAR.

O tempo de abertura necessário para recolher dados para os dois modos descritos atrás vai depender da velocidade de deslocamento da plataforma [26]:

$$t_A \approx \frac{\lambda R}{2V\delta_{cr} \cos(\theta_{sq})} \quad (2.3)$$

A resolução em distância para o spotlight SAR vem [26]:

$$\delta_{cr} \approx \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \approx \frac{\lambda R}{2L_{SA} \cos(\theta_{sq})} = \frac{\lambda R}{2Vt_A \cos(\theta_{sq})} \quad (2.4)$$



**Figura 5 - Spotlight SAR** [extraído de [12]]

iii) Por fim um modo existe o scan SAR. Este observa uma fatia de terreno que não é paralela a direcção de voo do radar, ou seja, com este modo de operação é possível efectuar pesquisa numa vasta área de terreno em todas as direcções. De notar que o alcance da pesquisa tem que ser limitado, uma vez que se for muito grande, a distância do radar ao ponto em pesquisa é elevada o que faz com que a SNR seja muito baixa e não permita construir uma imagem muito clara.

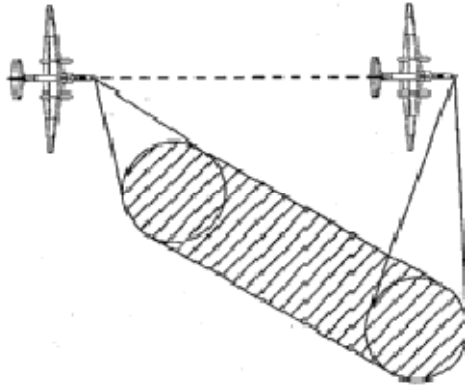


Figura 6 - Scan SAR [extraído de [21]]

#### 2.1.4. Interferência

Um dos tipos de interferência existentes em SAR é o *Speckle* que é um tipo de ruído produzido em sistemas coerentes, como os radares de abertura sintética. É causado pela interferência de ondas electromagnéticas que provêm da superfície ou de objectos. Este tipo de ruído produz nas imagens uma textura conhecida como “sal e pimenta” (Figura 7), que está relacionado com os parâmetros do radar e do tipo de superfície que está a ser iluminada.

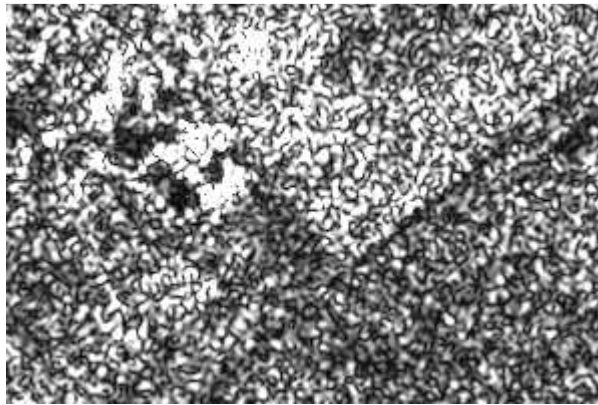


Figura 7 - Efeito "sal e pimenta" [extraído de [12]]

O modelo clássico do *Speckle* assume a presença de um elevado número de pontos independentes com características de reflexão idênticas. Quando estes são iluminados pelo SAR vão reflectir a energia com fase e potência diferentes, sendo depois todos somados. Esta soma pode ser alta ou baixa, dependendo se a interferência é construtiva ou destrutiva (Figura 8).

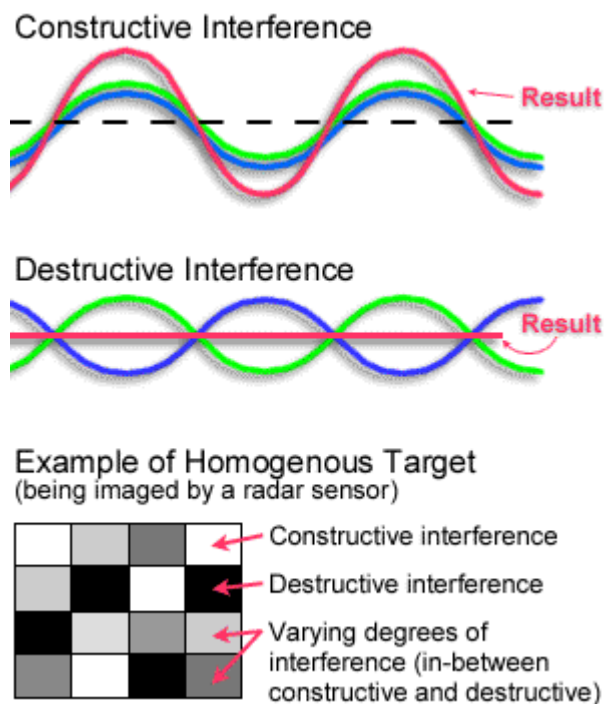


Figura 8 - Interferências (Construtiva e Destrutiva) [extraído de [12]]

Para reduzir este ruído é usual a utilização de um filtro que reduz o *Speckle* com a mínima perda de informação. Esta operação vai permitir uma melhor discriminação dos alvos existentes e uma mais fácil segmentação das imagens produzidas pelo SAR.

## 2.2. Processamento de sinal

Para o processamento de sinal é necessário formar o sinal SAR. A sequência de impulsos recebida é transformada num formato bidimensional, com dimensões de distância (direcção perpendicular ao deslocamento da plataforma de radar) e azimute (direcção de deslocamento da plataforma), formando assim o sinal SAR. O sinal é normalmente descrito considerando que o sinal recebido é proveniente de um único “scatterer” (processo que designa a energia que é dispersa pelo alvo). Assim, na direcção de azimute apenas é recebido um único eco proveniente do alvo em questão. Este eco recebido vai sofrer um atraso, sendo este dependente da distância do radar ao alvo. A distância referida varia à medida que o radar se vai deslocando no seu caminho. O número de ecos recebidos varia com o tempo que o alvo é iluminado pelo radar, ou seja, quanto mais tempo o alvo é iluminado pelo radar, maior é número de ecos recebidos. Este tempo determina o azimute do sinal SAR recebido do alvo. Na Figura 9 está representado o esquema de aquisição de dados do radar de abertura sintética.

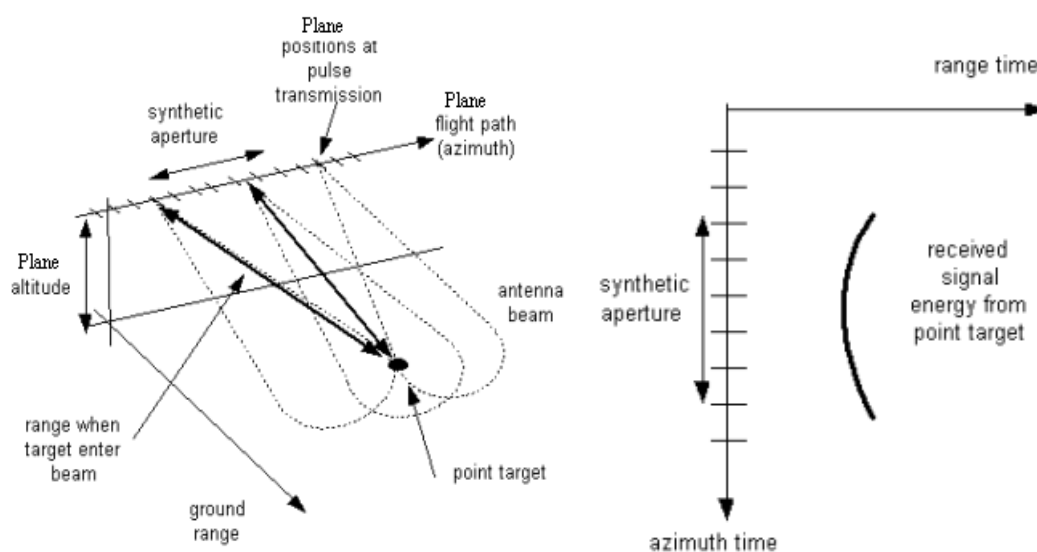


Figura 9 - Esquema de processamento do SAR

No *array* bidimensional, o sinal recebido de um alvo segue uma trajectória que depende da distância do alvo ao radar, como se pode verificar na Figura 9. Esta variação de distância vai afectar a fase de cada eco recebido. A antena transmite com uma frequência elevada, um sinal sinusoidal que foi modulado pelo impulso transmitido. O sinal transmitido é então reflectido pelo alvo, sendo recebido pela antena e desmodulado para obtenção do eco.

O atraso referido atrás vai provocar uma variação de fase na desmodulação, logo no eco recebido. Por a desmodulação ser feita coerentemente, a fase é mantida de pulso para pulso, resultando numa variação de fase em azimute no sinal SAR.

Para uma trajectória rectilínea, o *range*  $R(t)$  (distância até ao alvo como função do tempo de deslocamento do alvo no sentido de azimute) é uma função hiperbólica podendo ser aproximada por uma função quadrática ao longo da abertura sintética. Assim o sinal em azimute é aproximadamente um sinal FM linear, em que a frequência varia com o tempo de azimute. Esta propriedade faz com que este sinal possa ser comprimido, este processo será explicado mais à frente neste capítulo.

A variação de frequência no sinal em azimute pode ser considerada como a variação da frequência de Doppler no sinal. A frequência de Doppler depende da velocidade de deslocamento da plataforma, e como a direcção varia a cada posição desta, a frequência também vai variar com o tempo de azimute, daí que muitas vezes chama-se à frequência de azimute frequência de Doppler.

Na formação de imagem a maioria dos algoritmos tenta implementar técnicas de filtro adaptado. Este filtro é, do ponto de vista conceptual, bidimensional e variável no domínio espacial. Com isto a sua implementação no domínio espacial sem recurso a outras técnicas torna-se muito pesada em termos de cálculos.

### 2.2.1. Processamento em Distância

No processamento em distância, é conseguida uma boa resolução uma vez que é realizada uma compressão dos impulsos. Esta compressão é conseguida por causa da utilização do *chirp*, o que permite a utilização de sinais mais longos. Isto vai permitir a transmissão de mais energia, o que leva a uma maior energia recebida permitindo assim uma potência de pico menor. Então o sinal recebido é processado e comprimido no radar para uma pequena fracção da duração do impulso transmitido, de forma a obter uma maior resolução em distância. De notar que a compressão referida sobre os dados recebidos é efectuada a cada linha dos dados e é conseguida facilmente com recurso a FFT (*Fast Fourier Transform*). Este processo de compressão pode provocar o aparecimento de lobos laterais que podem indiciar que existem ecos próximos, e para isso é necessário o uso de técnicas especiais para os eliminar, aparecendo nas imagens uma sombra sobre os objectos.

O sinal depois de comprimido é passado por um canal de atraso que depende da frequência, o que vai permitir produzir um sinal recebido efectivamente mais pequeno relativamente ao emitido, uma vez que no sinal recebido apenas o que interessa é a informação relativa ao alvo, logo faz todo o sentido descartar o que não interessa, ou seja, a informação relativa ao clutter. Este processo descrito é também conhecido como “*matched filter*” (Filtro Adaptado).

Se dois objectos estiverem contidos no mesmo impulso este são facilmente distinguidos uma vez que os seus ecos vão ser reflectidos com frequências diferentes, logo como a frequência é conhecida os objectos são distinguidos.

#### 2.2.1.1. *Chirp*

O *chirp* não é mais que um sinal linear com modulação FM que varia a sua frequência ao longo do tempo. Este sinal é enviado pelo radar quando anda a pesquisar o terreno. Com a utilização do *chirp* é possível usar sinais mais longos, ou seja, de elevada duração temporal e grande largura de banda. Uma das principais características deste sinal é o facto de o impulso ser de elevada duração, mas apresenta uma largura de banda

correspondente a um impulso de curta duração. Este sinal é definido segundo a seguinte formula [3]:

$$\bar{s}(t) = \cos \left[ 2\pi \left( f_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \right) \right] \cdot \text{rect} \left( \frac{t}{T_P} \right) = \text{Re} \{ s(t) e^{j\pi \alpha t^2} \} \quad (2.5)$$

Em que  $s(t)$  vem [3]:

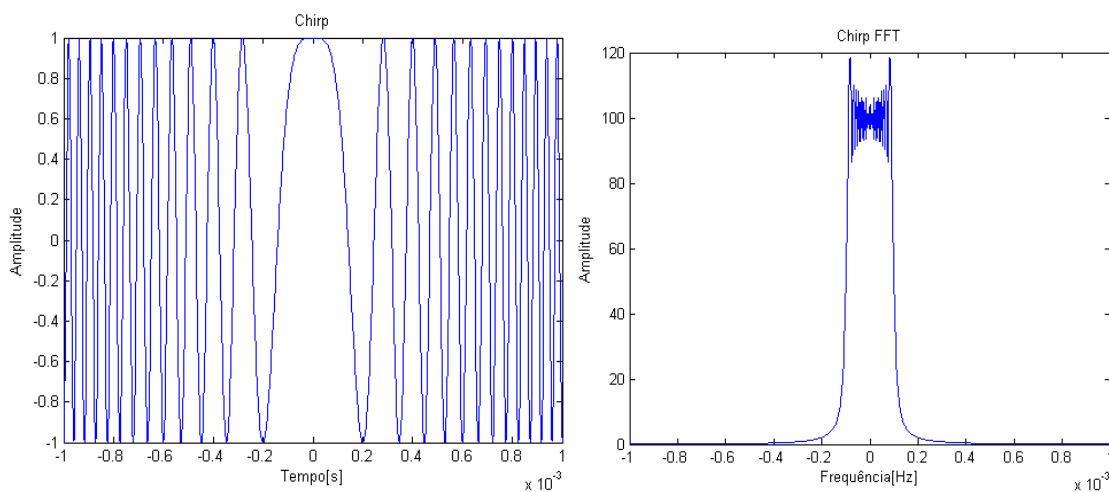
$$s(t) = e^{j\pi \alpha t^2} \text{rect} \left( \frac{t}{T_P} \right) \quad (2.6)$$

Em que  $f_0$  é a frequência da portadora,  $\alpha$  o coeficiente de variação do *chirp*,  $T_P$  o tempo de duração do pulso enviado.

O coeficiente de variação varia linearmente com a largura de banda do sinal ( $\beta$ ) e depende igualmente da duração do pulso emitido.

$$\alpha = \frac{\beta}{T_P} \quad (2.7)$$

Na Figura 10 encontra-se o exemplo de um *chirp* modulado com frequência de portadora zero, ou banda de base, com largura de banda de 55 kHz, tempo de pulso de 2 ms.



(a) *Chirp* no domínio do tempo

(b) *Chirp* no domínio da frequência

**Figura 10 - *Chirp* em banda de base**

### 2.2.1.2. Sinal recebido

Para formar o sinal recebido é necessário definir a reflectividade de cada alvo, que é definida como sendo uma função complexa que depende da frequência e do ângulo de visão, logo a reflectividade vem [3]:

$$q_0(x, y) = m(x, y)e^{j\psi(x, y)} \quad (2.8)$$

Em que  $m(x, y)dxdy$  é a fracção do sinal enviado que é reflectido para o radar, resultado da reflexão de um alvo com dimensão  $dx \times dy$  e centrado em  $(x, y)$ .  $\psi(x, y)$  é o desvio de fase provocado pelos alvos.

Para estimar o sinal recebido referente a um ponto reflector único localizado em  $x = x_0$  tem-se [3]:

$$g_0(t) = m(x_0) \cos \left[ 2\pi \left( f_0 \left( t - \frac{2x_0}{c} \right) + \frac{1}{2} \alpha \left( t - \frac{2x_0}{c} \right) \right) + \psi(x_0) \right] \cdot \text{rect} \left( \frac{t}{T_P} - \frac{2x_0}{cT_P} \right) dx \quad (2.9)$$

Em que  $c$  representa a velocidade de propagação da onda, e o factor  $\frac{2x_0}{c}$  representa o atraso de ida e volta da onda.

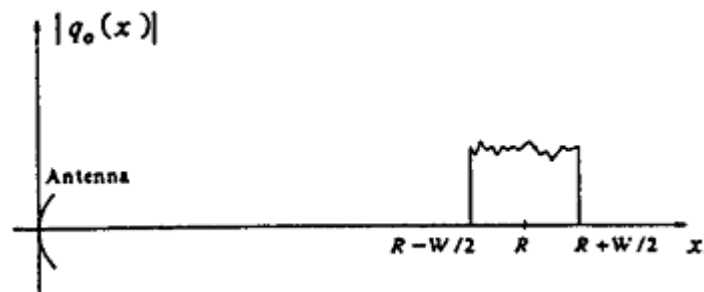


Figura 11 - Obstáculo centrado em  $R$  e comprimento  $W$  [extraído de [3]]

Para um alvo não pontual centrado em R e com comprimento W (Figura 11), o sinal recebido é dado pelo integral de todos os sinais provenientes da região compreendida entre  $R - W/2$  e  $R + W/2$  na direcção de distância.

$$\bar{g}(t) = \int_{R-W/2}^{R+W/2} m(x) \operatorname{Re} \left\{ s \left( t - \frac{2x_0}{c} \right) \cdot \exp \left[ j \left[ 2\pi f_0 \left( t - \frac{2x_0}{c} \right) + \psi(x) \right] \right] \right\} dx \quad (2.10)$$

### 2.2.1.3. Compressão de impulso

Uma técnica comum para remover a portadora, é a utilização de um desmodulador em fase e quadratura, uma vez que o sinal encontra-se deslocado por a portadora. Antes de qualquer processamento é necessário colocar o sinal em banda de base. Para isso recorre-se ao desmodulador, que remove a portadora e ao mesmo tempo separa o sinal em duas componentes de fase e quadratura, como se pode verificar na Figura 12.

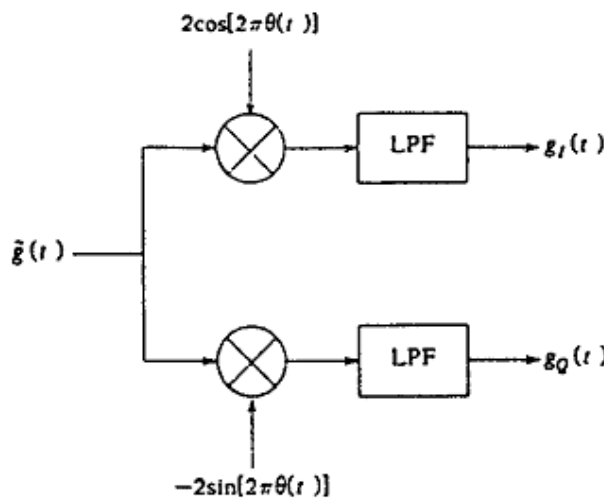


Figura 12 - Desmodulador em fase e quadratura [extraído de [3]]

Desmodulando  $\bar{g}(t)$  como é mostrado na Figura 12 e definindo  $\bar{g}(t) = g_I(t) + jg_Q(t)$  e  $\theta(t) = f_0 t$ , então teremos o sinal recebido na seguinte forma [3]:

$$\bar{g}(t) = \int_{R-W/2}^{R+W/2} m(x) e^{j[\psi(x)-2kx]} s \left( t - \frac{2x}{c} \right) dx \quad (2.11)$$

em que  $k = \frac{2\pi f_0}{c}$  e representa o número de onda.

Em SAR como na formação de imagem apenas é normalmente representada a amplitude da reflectividade do terreno, então a fase pode ser absorvida no modelo de reflectividade não tendo assim efeito no resultado final.

$$q(x) = q_0(x)e^{-j2kx} = m(x)e^{j[\psi(x)-2kx]} \quad (2.12)$$

Aplicando o modelo modificado da reflectividade em (2.11) vem:

$$\bar{g}(t) = \int_{R-W/2}^{R+W/2} q(x)s\left(t - \frac{2x}{c}\right) dx \quad (2.13)$$

Se fizer uma mudança de variável na expressão anterior,  $x = \xi$ , e  $t = \frac{2x}{c}$ , então o sinal recebido no domínio espacial fica [3]:

$$g(x) = \int_{R-\frac{W}{2}}^{R+\frac{W}{2}} q(\xi)s\left(\frac{2(x-\xi)}{c}\right) d\xi \quad (2.14)$$

Logo  $g(x)$  é formado pela convolução da reflectividade do terreno  $q(x)$  com  $s\left(\frac{2x}{c}\right)$ , assim  $g(x)$  representa a transformada de fourier da reflectividade  $q$  ao longo de toda a gama de frequências contida em  $s\left(\frac{2x}{c}\right)$ .

#### 2.2.1.4. Estimação da reflectividade

Para estimar a reflectividade pode-se processar  $g(x)$  com um filtro adaptado que possui uma resposta impulsiva  $h_r(x) = s^*\left(-\frac{2x}{c}\right)$ . Assim uma estimativa da reflectividade  $q(x)$  é [3]:

$$\hat{q}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\gamma) h_r(x - \gamma) d\gamma = \int_{-\infty}^{\infty} g(\gamma) s^*\left(\frac{2(\gamma-x)}{c}\right) d\gamma \quad (2.15)$$

Da fórmula acima pode-se perceber que  $\hat{q}(x)$  é a correlação cruzada de  $g(x)$  com uma replica do *chirp* em banda de base.

Aplicando a propriedade associativa da convolução

$$\hat{q}(x) = q(x) * \left[ s\left(\frac{2x}{c}\right) * s^*\left(-\frac{2x}{c}\right) \right] \quad (2.16)$$

Admitindo que o termo entre parênteses rectos pode ser escrito da seguinte forma utilizando a autocorrelação

$$\rho(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) s^*(\tau - t) d\tau \quad (2.17)$$

Então aplicando (2.17) em (2.16) a reflectividade estimada vem:

$$\hat{q}(x) = q(x) * \rho\left(\frac{2x}{c}\right) \quad (2.18)$$

### 2.2.1.5. Resolução em distância

A resolução em distância do radar é determinada pela autocorrelação de  $\hat{q}(x)$  com o *chirp*. Para *chirps* com elevado produto tempo-largura de banda:

$$\rho\left(\frac{2x}{c}\right) \approx \text{sinc}\left(\frac{2\pi\beta x}{c}\right) \quad (2.19)$$

Como  $\text{sinc}(x) \triangleq \frac{\sin(x)}{x}$ , então a resolução em distancia é dada por:

$$\delta_r = \frac{c}{2\beta} \quad (2.20)$$

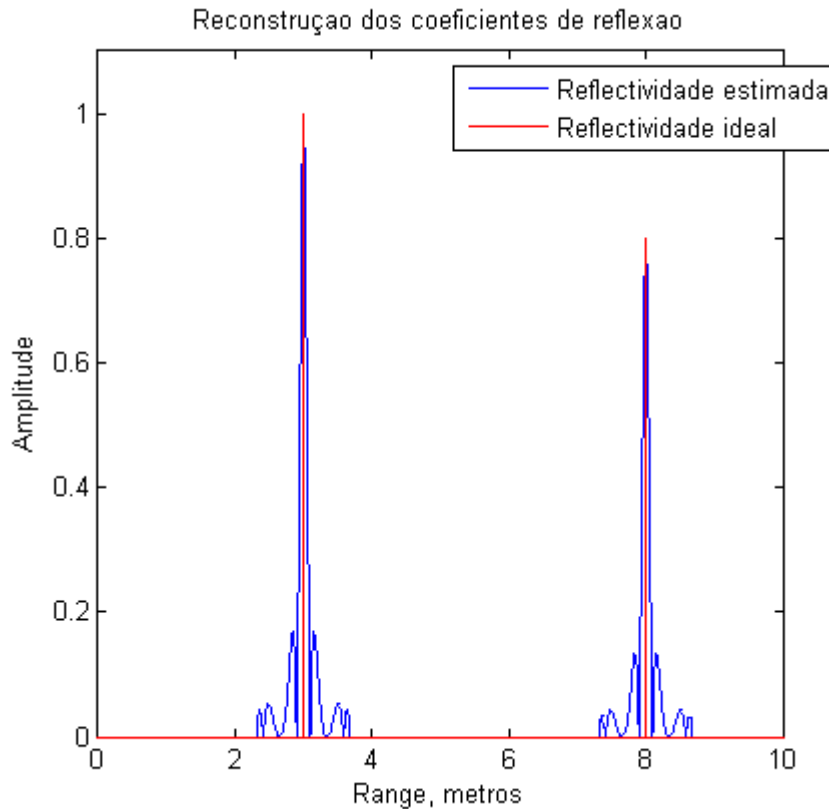
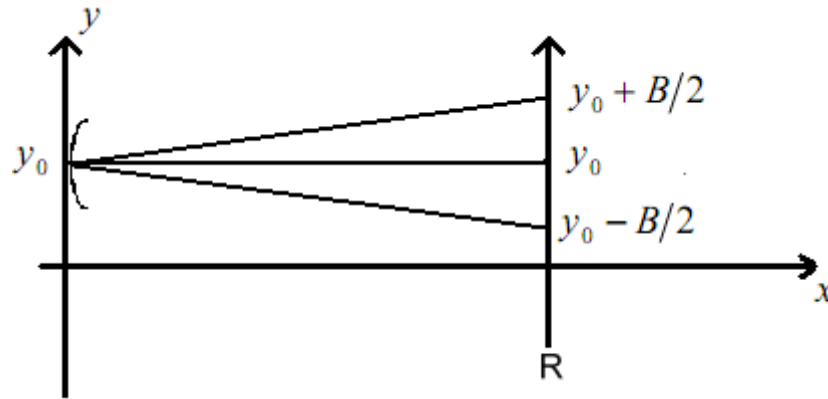


Figura 13 - Comparação entre reflectividade ideal e real

Na Figura 13 pode-se encontrar uma comparação entre a reflectividade ideal e a reflectividade estimada. Idealmente era desejado estimar a reflectividade de um alvo em que apenas aparecesse um ponto. Mas na realidade o que se consegue estimar é uma mancha em torno do ponto onde se encontra o alvo, isto derivado à *sinc* que resulta da aplicação da convolução, como descrito anteriormente.

### 2.2.2. Processamento em azimuth

O processamento em azimuth é muito idêntico ao processamento em distância, ou seja, visto o sinal utilizado nesta direcção ser muito idêntico ao *chirp* é então possível realizar compressão. A compressão é conseguida devido a questões de geometria, demonstrando-se que é praticamente igual á filtragem adaptada realizada em distância.



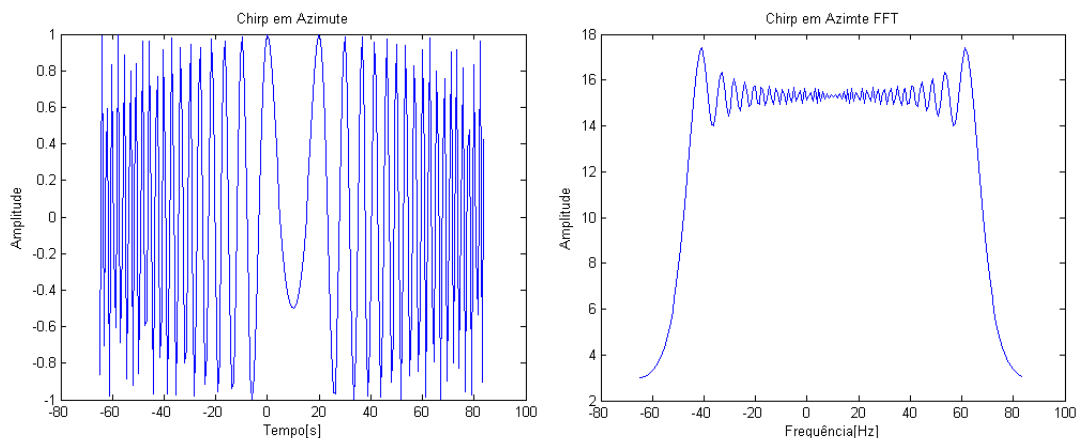
**Figura 14 - Geometria de estudo para processamento em azimute**

Para estudar o processamento em azimute construiu-se este exemplo (Figura 14) que consiste num conjunto de pontos reflectores situados em  $x = R$ , com reflectividade dada por [3],

$$q_0(y) = m(y)e^{j\psi(y)} \tag{2.21}$$

Nesta direcção, para simplificar os cálculos, é enviado um sinal de largura de banda nula. Na Figura 15 encontra-se representado o *chirp* em azimute no domínio do tempo e frequência:

$$\bar{g}(t) = \cos(2\pi f_0 t) = e^{-j2kr_1} \tag{2.22}$$



**Figura 15 - Chirp em azimute**

O sinal recebido é dado pelo somatório de todos os ecos recebidos, mas que estejam contidos nos limites de abertura do radar,  $y_0 - B/2$  e  $y_0 + B/2$

$$\bar{g}(t, y_0) = \int_{-\infty}^{\infty} m(y)w_a(y - y_0) \cdot \text{Re} \left\{ \exp \left[ j \left[ 2\pi f_0 \left( t - \frac{2r_1(R, y - y_0)}{c} \right) + \psi(y) \right] \right] \right\} dy \quad (2.23)$$

Na expressão anterior  $w_a(y)$  corresponde a função diagrama de radiação da antena, em que toma o valor 1 para  $|y| \leq B/2$  e 0 para os outros casos.  $B = \frac{\lambda R}{D}$  e representa a largura do feixe da antena, usualmente designada por abertura a 3dB.  $r_1(R, y - y_0)$  é a distância que vai da antena a um ponto reflector localizado em  $(R, y)$ . Depois de efectuar a desmodulação em quadratura da mesma forma como é feito em distância, o sinal recebido vem

$$g(y_0) = \int_{-\infty}^{\infty} q_0(y)w_a(y - y_0)e^{-j2kr_1(R, y - y_0)} dy \quad (2.24)$$

Aplicando em (2.24) a transformação

$$r_1(R, y - y_0) = \sqrt{R^2 + (y - y_0)^2} \approx R + \frac{(y_0 - y)^2}{2R} \quad (2.25)$$

Obtém-se

$$g(y_0) = \int_{-\infty}^{\infty} q_0(y)w_a(y - y_0)e^{\frac{-jk(y_0 - y)^2}{R}} dy. \quad (2.26)$$

De notar que “g” resulta da convolução de “q” com o *chirp* definido atrás, e para estimar a reflectividade pode-se utilizar a técnica de compressão de pulso (filtro adaptado) utilizada no processamento em distância.

Pode-se concluir que um B grande, ou seja, uma antena pequena, vai aumentar a resolução em azimuth, uma vez que  $q_0(y)$  não é apenas convolucionado com  $w_a$  mas sim também com um *chirp* linear, que aumenta a sua largura de banda a medida que o B aumenta. Pode-se então dizer que a resolução em azimuth (2.27) em *Strip-mapping* SAR é inversamente proporcional a B e assim proporcional ao diâmetro da antena D.

$$\Delta y = \frac{D}{2} \quad (2.27)$$

### 2.2.3. Formação de imagem

A formação de imagens em SAR é baseada na teoria de um sinal bidimensional, que beneficia da clássica formação de imagem em “*range*”, ou seja, através do envio de um sinal e a recepção dos respectivos ecos, e da formação de imagem em “*cross-range*”, ou seja, em abertura sintética.

Para adquirir os dados brutos (*raw data*) o radar desloca-se segundo uma geometria *Stripmap*. Tal como descrito anteriormente, este tipo de radar é muito utilizado na formação de imagens. Este vai iluminar uma faixa de terreno e vai recolhendo ecos dos objectos existentes nesta. Os objectos vão ser iluminados por vários impulsos durante o intervalo de tempo necessário para que a plataforma se desloque de um comprimento igual ao da faixa. Depois de adquiridos os dados, estes são processados segundo o processo descrito anteriormente mas agora juntando os dois domínios, ou seja, juntando a direcção de distância com a direcção de azimute.

## 2.3. Problemas na formação de imagem

### 2.3.1. Tipos de distorção

Na formação de imagens SAR encontram-se vários tipos de problemas. A distorção na imagem, que pode vir de várias origens diferentes, tais como um veículo a deslocar-se radialmente face ao radar, o que pode originar o veículo aparecer na imagem reconstruída deslocado do sítio onde devia estar. Outro problema consiste em processar um alvo em movimento como se este estivesse parado, o que pode originar o aparecimento de uma mancha no sítio onde o alvo se encontra não sendo possível identificar o mesmo.

Outro problema que se pode verificar é o aparecimento de fenómenos que dependem da geometria do terreno, ou seja, quando as características geográficas do terreno possuem montanhas ou objectos com grande elevação. Isto pode levar a que o sinal enviado pelo radar encontre primeiro o topo e só posteriormente encontre a base, provocando na imagem construída o aparecimento de um objecto inclinado na direcção do sensor, este fenómeno é chamado de *Layover*. Outro fenómeno é o oposto do anterior em que o sinal chega primeiro a base do que ao topo, originando na imagem um objecto mais pequeno do que realmente é, e é chamado de *Foreshortening*. De facto estes dois últimos fenómenos são realmente o oposto um do outro, uma vez que o efeito de *Layover* é mais acentuado quando o alvo está mais próximo do radar e o efeito *Foreshortening* quando o alvo está mais longe do radar. Por fim pode-se verificar um último fenómeno conhecido por *Shadow* que como o nome indica verifica-se quando existem partes do alvo que não são iluminadas pelo radar, aparecendo assim na imagem uma região a preto, este efeito é mais acentuado quando o alvo está muito longe do radar. Na Figura 16 pode-se encontrar exemplos dos vários tipos de distorção descritos.

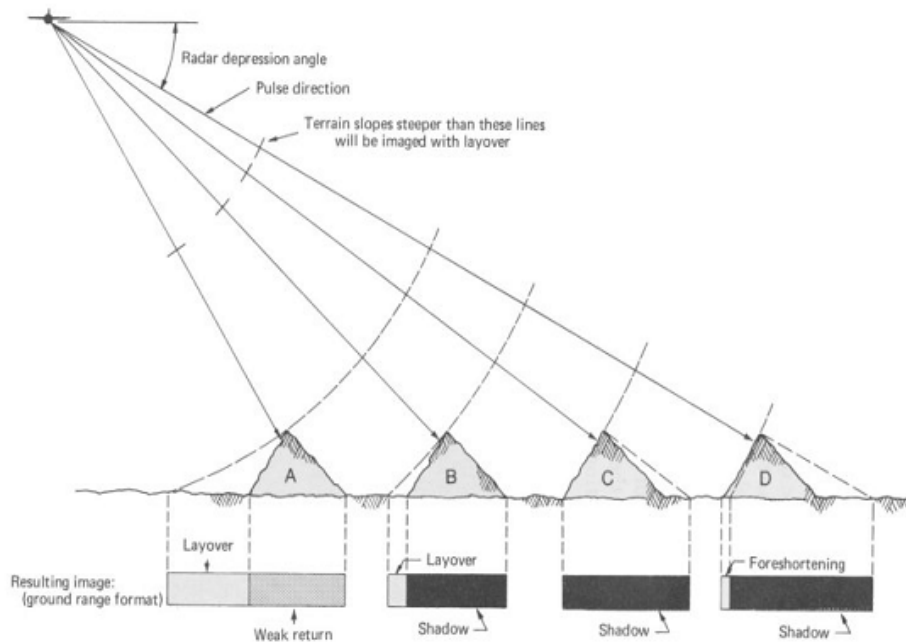


Figura 16 - Tipos de distorção[extraído de [5]]

### 2.3.2. Alvos móveis

Os alvos móveis provocam nas imagens alterações devido a sua velocidade, ou seja, na direcção de azimute a velocidade provoca o aparecimento de uma mancha (Figura 17). Ao passo que na direcção de distancia provoca um deslocamento do alvo na direcção de azimute (Figura 17). Estes erros podem ser minimizados recorrendo a técnicas que irão ser descritas mais a frente neste documento.

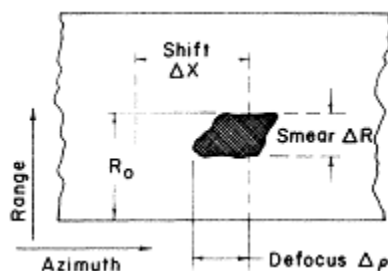


Figura 17 - Efeitos da velocidade nas imagens [extraído de [3]]

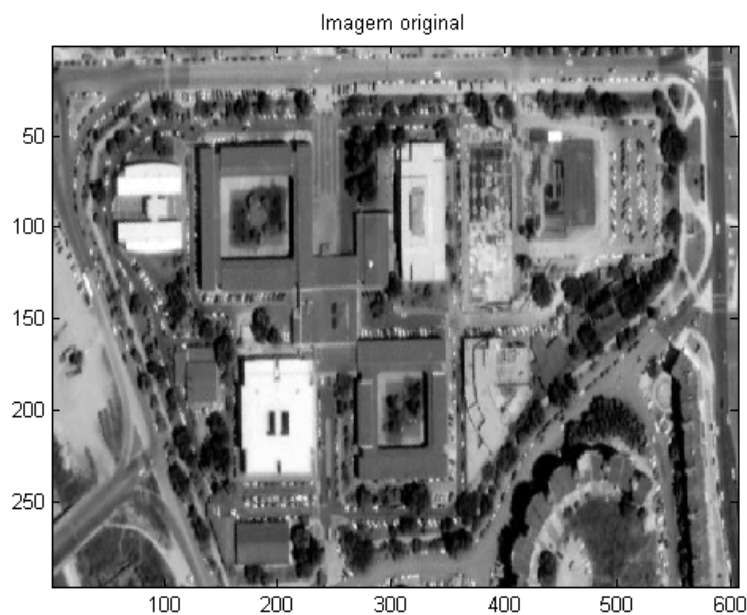


# Capítulo 3

## 3. Simulador

### 3.1. Introdução

Depois de estudados os processos de aquisição e processamento de dados referentes a pedaços de terrenos iluminados pelo radar, implementaram-se estes num simulador que foi desenvolvido em MatLab. De seguida mostram-se alguns exemplos do processamento efectuado.



**Figura 18 - Imagem processada no simulador**

## 3.2. Simulação no domínio temporal

### 3.2.1. Dados Brutos (*RawData*)

Para gerar os dados brutos referente à Figura 18 primeiro definiu-se os parâmetros do sistema, como se pode consultar nas tabelas abaixo.

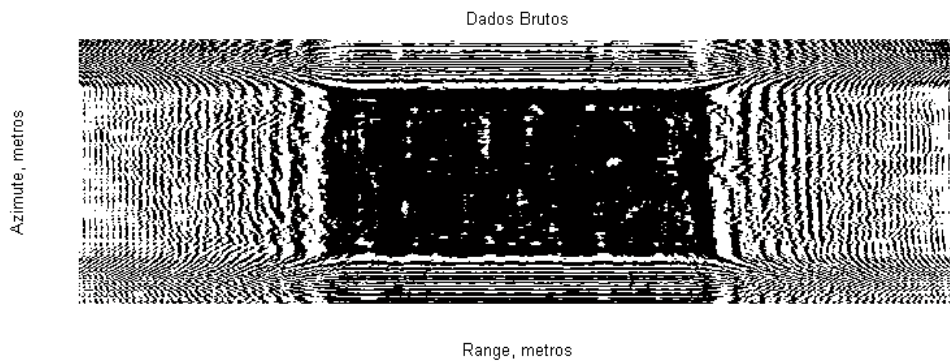
**Tabela 1 - Parâmetros da plataforma**

	Diâmetro antena [m]	Altura Plataforma [m]	Posição plataforma	Frequência Portadora [Hz]
Plataforma	2	10000	10	10e9

**Tabela 2 - Parâmetros do *Chirp***

	Largura Banda [Hz]	Tempo de Pulso [s]	Frequência Portadora [Hz]
Chirp	100e3	2e-3	0

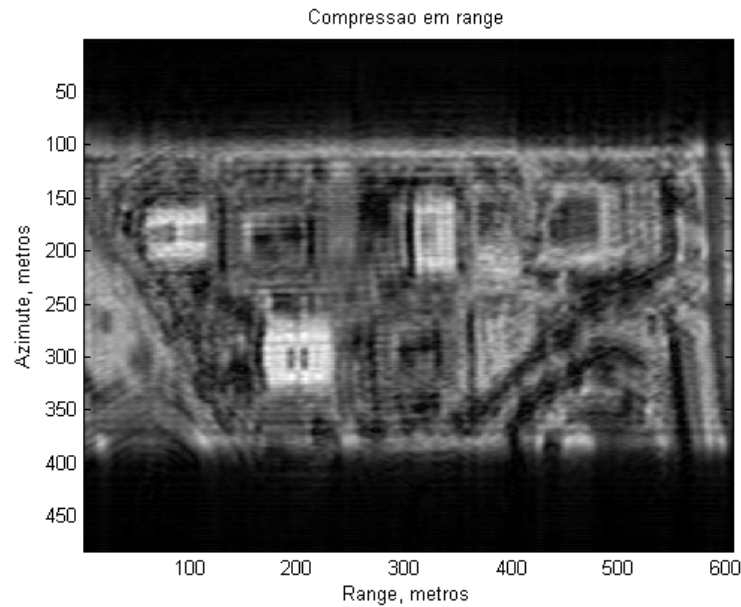
Depois de definidos os parâmetros, definiu-se o *chirp* em distância e em azimute, como descrito anteriormente neste documento. Depois geraram-se os dados brutos com recurso a convolução das linhas da imagem com o *chirp* em distância, e do *chirp* em azimute com as colunas. Obtendo-se o resultado demonstrado na Figura 19.



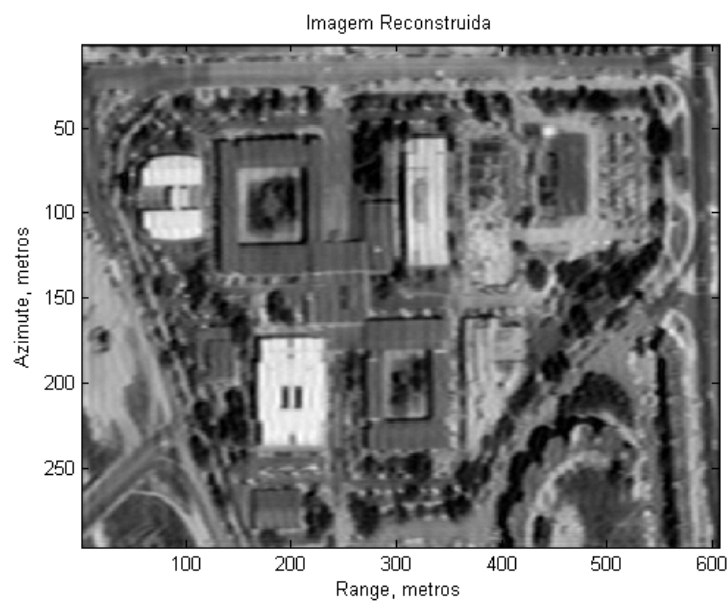
**Figura 19 - Dados Brutos**

### 3.2.2. Compressão em distância e azimute

Obtidos os dados brutos, procedeu-se à compressão destes, primeiro, compressão em distância e depois compressão em azimute, aplicando o processo descrito atrás.



**Figura 20 - Compressão em distância**



**Figura 21 - Compressão em azimute**

Depois de efectuado o processamento verifica-se que o sistema apresenta resultados bastante aceitáveis, tal como seria de esperar. O único problema que se encontra é o facto do tempo que o sistema demora a processar os dados, uma vez que este é efectuado no domínio temporal. Isto faz com que o peso computacional seja mais elevado, na ordem de  $N^2$ .

De seguida mostra-se a mesma solução mas com recurso ao domínio da frequência que apresenta os mesmos resultados mas com um peso computacional mais baixo, na ordem de  $\frac{N}{2} \log_2 N$ .

### 3.3. Simulação no domínio da frequência

#### 3.3.1. Dados Brutos (*RawData*)

Para esta simulação utilizou-se a Figura 18 para gerar os dados brutos, obtendo-se o resultado da Figura 22.

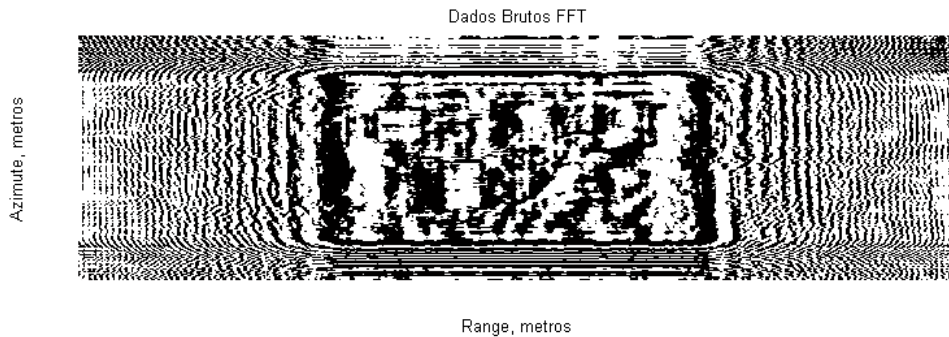
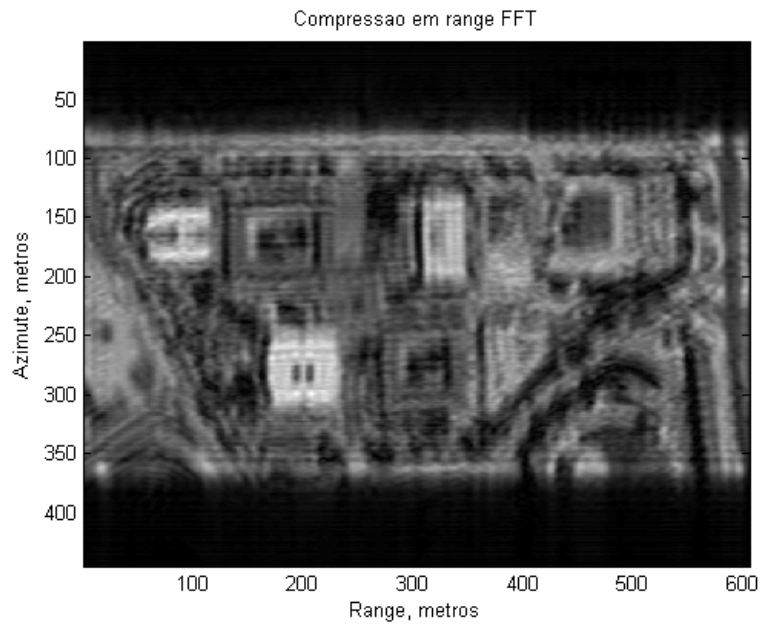
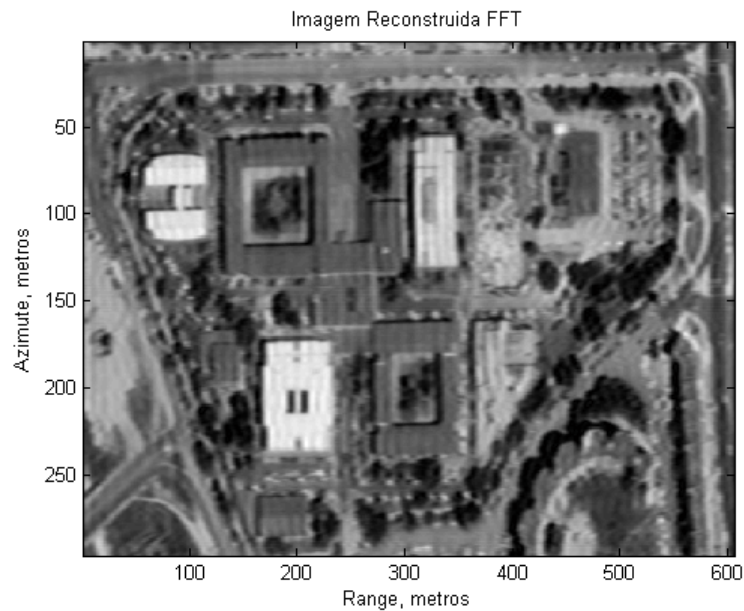


Figura 22 - Dados Brutos FFT

### 3.3.2. Compressão em distância e azimute



**Figura 23 - Compressão em distância FFT**



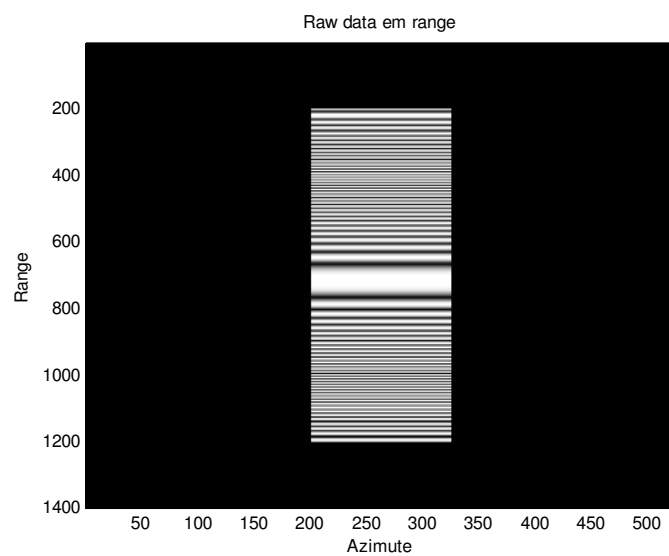
**Figura 24 -Compressão em azimute FFT**

Como era de esperar os resultados obtidos são idênticos aos realizados para o domínio temporal, mas com a vantagem de o processamento ser bastante mais rápido, isto

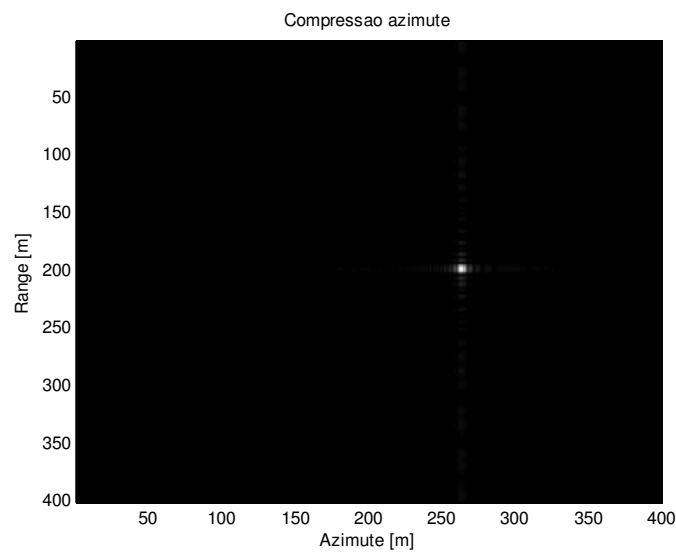
porque no domínio da frequência o processamento é efectuado tudo de uma vez só, ao passo que no domínio temporal este é efectuado linha a linha e depois coluna a coluna.

### 3.4. *Alvos móveis*

Neste sub-capítulo vai ser ilustrado um cenário onde existe um alvo pontual que se desloca com ambas as velocidades, azimute e range. O alvo desloca-se com uma velocidade de 5 km/h em range e 20 km/h em azimute.



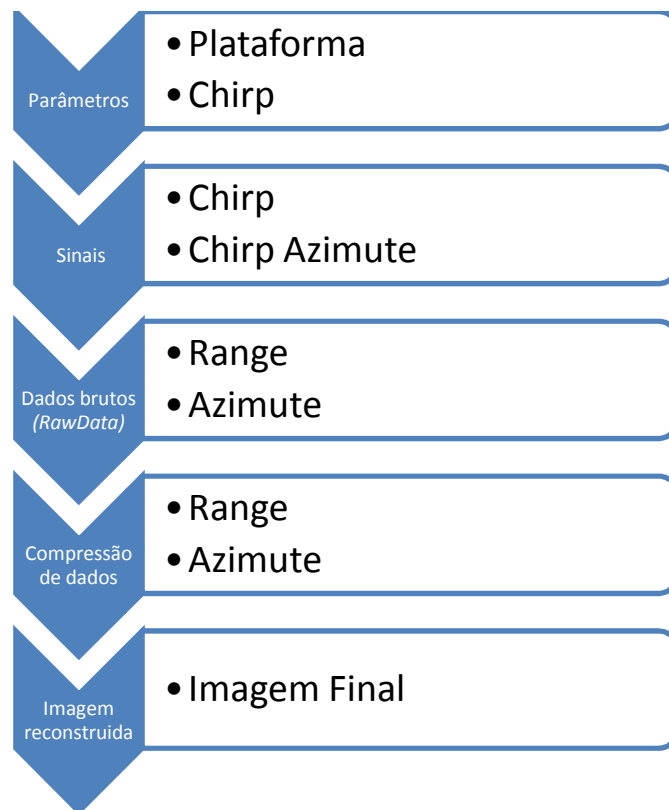
**Figura 25 - Dados brutos gerados de um alvo com ambas as velocidades**



**Figura 26 - Imagem reconstruída de um alvo com ambas as velocidades**

Nas figuras 25 e 26 encontram-se ilustrados os dados brutos e a imagem reconstruída de um alvo com ambas as velocidades. Pode-se verificar que o alvo sofre um deslocamento na direcção de azimute face à posição inicial (200,200) e sofre igualmente um pequeno espalhamento na mesma direcção. No caso da simulação com ambas as velocidades separadas, estas encontram-se feitas no capítulo anterior.

De seguida na Figura 27 demonstra-se em esquema a sequencia utilizada pelo simulador para obter os resultados pretendidos.



**Figura 27 - Processo de formação de imagem no simulador**



# Capítulo 4

## 4. Estado da arte

### 4.1. *Introdução*

Neste capítulo é dada uma breve descrição de técnicas desenvolvidas que permitem detectar, identificar e estimar a velocidade de objectos móveis, mais concretamente embarcações. As técnicas baseiam-se em dois tipos de abordagens, *Multilook Image* e *Singlelook Image*. Na primeira o princípio de funcionamento assenta sobre um processamento efectuado na imagem que é obtida a partir do sistema SAR, em que esta é segmentada em várias outras imagens. Este tipo de abordagem geralmente é aplicado no processamento em azimuth.

Na abordagem *Singlelook* a imagem obtida do sistema é a que é utilizada para o processamento que geralmente é utilizado na direcção perpendicular à de azimuth, ou seja, a direcção de range.

#### **4.2. Técnicas de Detecção e estimação de velocidade de embarcações**

Tunaley em [2], tenta estimar a posição e a velocidade das embarcações pelos braços da onda que os navios provocam quando estão em deslocamento, provocando uma onda em forma de “V”. O desvio do navio que é provocado na imagem de radar devido à velocidade, permite estimá-la. Em certos casos a velocidade pode ser também calculada pela abertura do “V”, ou seja, quanto mais rápido a embarcação se deslocar, mais aberto é o “V”. A estimação de velocidade de embarcações com esta técnica pode apresentar alguns problemas.

Um navio nem sempre é acompanhado por uma onda à sua frente, uma vez que o aparecimento desta depende do tipo de navio, velocidade e tamanho.

O tipo de onda mais comum é a onda turbulenta, e visto que o ângulo de abertura é pequeno pode-se estimar com precisão a frente da embarcação. Esta normalmente é escura, mas pode ser flanqueada por 1 ou 2 linhas claras. Logo é mais simples identificar a escura e as linhas claras podem ser usadas para uma melhor identificação da frente do navio. O desvio que o navio sofre nas imagens devido à velocidade é principalmente afectado pela componente da velocidade da embarcação ao longo da direcção de distância (*range*).

Outra técnica proposta em [9] por Ouchi, tenta detectar embarcações com recurso a um processo diferente da anterior, ou seja, esta técnica tem a vantagem de não recorrer à intensidade dos pixéis para identificar embarcações, uma vez que se recorrer a uma técnica de identificação por limiar de comparação, nos casos de mar muito agitado a água pode-se confundir com as embarcações tornando assim a detecção difícil. Esta técnica faz a detecção através da comparação de sub-imagens (*Multilook*) construídas a partir da imagem original. Esta é dividida em partes e cada parte é analisada separadamente, e assume que não se sobrepõem, o que leva a que cada sub-imagem tenha um atraso diferente para a mesma área. Esta técnica assume ainda que a superfície do mar consiste em pequenas ondas e que cada uma é independente das outras, logo não existe correlação entre elas. Ao passo que a embarcação é maior que a resolução da

imagem, logo a correlação entre sub-imagens consecutivas é elevada apesar de se verificar uma mancha na imagem quando a embarcação se encontra em movimento. Para medir o grau de correlação utiliza-se a correlação cruzada a 2 dimensões (2D-CCF), que representa o grau de similiaridade entre 2 sub-imagens. Quando existem objectos com elevada correlação a 2D-CCF apresenta um pico bastante acentuado na zona onde o objecto se encontra, logo através da medição deste pico consegue-se estimar o deslocamento que este sofreu devido à velocidade, permitindo estimar a velocidade.

Uma outra técnica proposta por Kirscht em [10] e complementada em [11] tem por base os mesmos princípios da técnica proposta por Ouchi, no sentido em que também segmenta a imagem obtida pelo radar em sub-imagens. Mas para a detecção e estimação da velocidade utiliza um outro método.

Para detectar os alvos, a pesquisa é feita começando no pixel com maior intensidade. De seguida este pixel e os que o rodeiam são seleccionados segundo um critério.

Antes de aplicar este, é necessário calcular a média das intensidades da imagem. Posto isto, começa-se por seleccionar o pixel com maior intensidade, ou seja, com intensidade superior à média calculada, que vai ficar como limiar mínimo. Os pixéis pertencentes a um candidato a alvo móvel estão contidos num limite inferior e superior, sendo que o superior depende do comprimento dos objectos na direcção de azimute e deve ser escolhido segundo a máxima velocidade detectável. De referir que a média dos pixéis pertencentes a um candidato é muito superior a média dos pixéis da imagem toda.

Depois de terminado o processo (resultado positivo ou negativo) os passos descritos são repetidos para o resto dos pixéis com intensidade igual. No caso de não haver mais pixéis com esta intensidade vai-se baixando até chegar ao limite mínimo, a média total.

Para a estimação da velocidade para cada candidato é criado e calculado um vector deslocamento através da análise das sub-imagens criadas. Para obter o vector é colocada numa sub-imagem uma janela sobre o candidato, estando este situado no centro desta. Depois vai-se à sub-imagem anterior e procura-se o mesmo candidato e coloca-se uma outra janela sobre este. A diferença entre as duas janelas é o vector deslocamento. Esta pesquisa tem como objectivo encontrar a melhor semelhança entre as duas janelas, e para isso existem 4 critérios de semelhança. CCC (*Cross Correlation Coefficient*), NCCF (*Cross Correlation Coefficient Function*), MSE (*Mean Square Error*) e por fim

MAD (*Mean Absolute Difference*). De todos estes critérios o NCCF apresenta os melhores resultados, mas o MSE tem a vantagem de que a sua implementação é bastante mais fácil de executar, e apresenta resultados bastante satisfatórios.

A componente da velocidade em azimute é calculada com recurso ao vector deslocamento, ao passo que a velocidade em *range* é calculada recorrendo ao cálculo do desvio de doppler que se verifica na imagem.

Em [23] Marques propõe um método um pouco diferente dos descritos atrás em que para identificar possíveis alvos, faz uma re-síntese da assinatura dos alvos, ou seja, na imagem obtida através do sistema SAR, vai-se obter o espectro de frequência deste. Depois um filtro rejeita banda é utilizado para eliminar os dados estáticos. Uma vez que num sistema SAR os alvos estáticos como são o caso da superfície do oceano, ou mesmo o rasto provocado por uma embarcação, aparecem sempre numa banda que é conhecida *a priori*. No caso de alvos que estejam em movimento estes vão aparecer deslocados desta banda já conhecida. Logo, eliminando esta banda no domínio da frequência e depois transportando novamente para o domínio temporal (formando novamente uma imagem) é possível verificar que apenas ficam visíveis os alvos moveis, uma vez que o *clutter* é eliminado fazendo assim que a sua potência baixe e o alvo móvel que antes estava camuflado no meio do *clutter* se torne visível, pois a potencia que antes era elevada foi em parte filtrada, e a restante é espalhada pela superfície. Sobrepondo este resultado na imagem obtida através do sistema anterior pode-se verificar onde se encontram os objectos. Na Figura 28 encontra-se esquematizado o processo descrito que permite estimar a posição de alvos móveis.

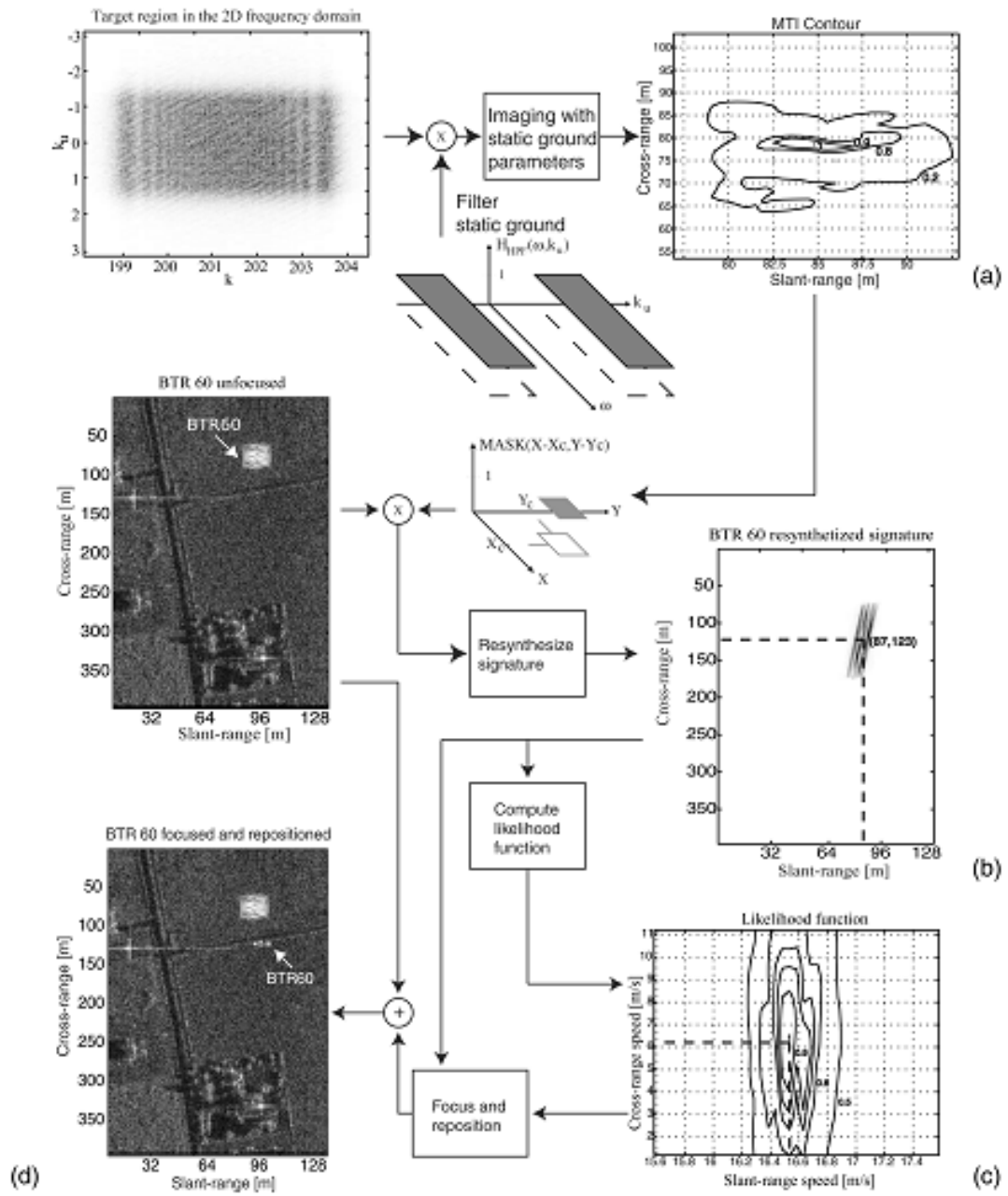


Figura 28 - Processo de detecção de alvos móveis [extraído de [23]]



# Capítulo 5

## 5. Abordagem Proposta

### 5.1. *Introdução*

Neste capítulo expõe-se uma nova abordagem para a detecção e estimação de velocidades de embarcações que recorre à elevada coerência da intensidade dos pixéis no caso de embarcações, em que através de uma correlação 2D entre duas (ou mais) sub-imagens se consegue saber se uma embarcação se encontra ou não na zona iluminada pelo radar.

A velocidade da embarcação pode ser estimada através da distância da embarcação ao seu rasto (*Ship Wake*) [2]. A detecção do rasto é possível com recurso à Transformada de Radon.

## 5.2. *Detecção de alvos*

Para a detecção das embarcações, divide-se a abertura sintética em pequenas sub-aberturas. Processando-as de forma separada consegue-se obter sub-imagens que vão permitir obter uma visão da mesma área em diferentes instantes de tempo e ângulos [9]. As sub-imagens não exibirão elevada correlação caso não hajam embarcações, uma vez que numa célula de resolução existem diversos reflectores incoerentes entre si, e também devido ao facto de as ondas se movimentarem mais rapidamente relativamente à embarcação durante a abertura sintética.

No caso de uma embarcação existe uma grande correlação na mesma região em sub-imagens diferentes, mesmo estando esta em movimento, apesar de surgir desfocada. Assim, para detectar uma embarcação utiliza-se a correlação 2D entre duas sub-imagens consecutivas, tal como proposto em [9]. Se não se encontrar nenhum alvo nas sub-imagens então o resultado da correlação será muito baixo (Figura 29). No caso de haver uma embarcação então aparece um pico na zona onde esta se encontra (Figura 30).

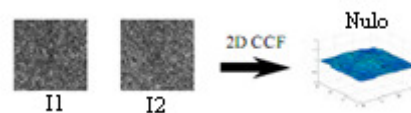


Figura 29 - Correlação 2D para uma área onde não existem embarcações [adaptado de [9]]

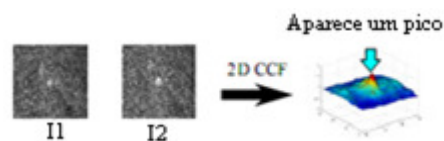


Figura 30 - Correlação 2D para uma zona onde existe uma embarcação [adaptado de [9]]

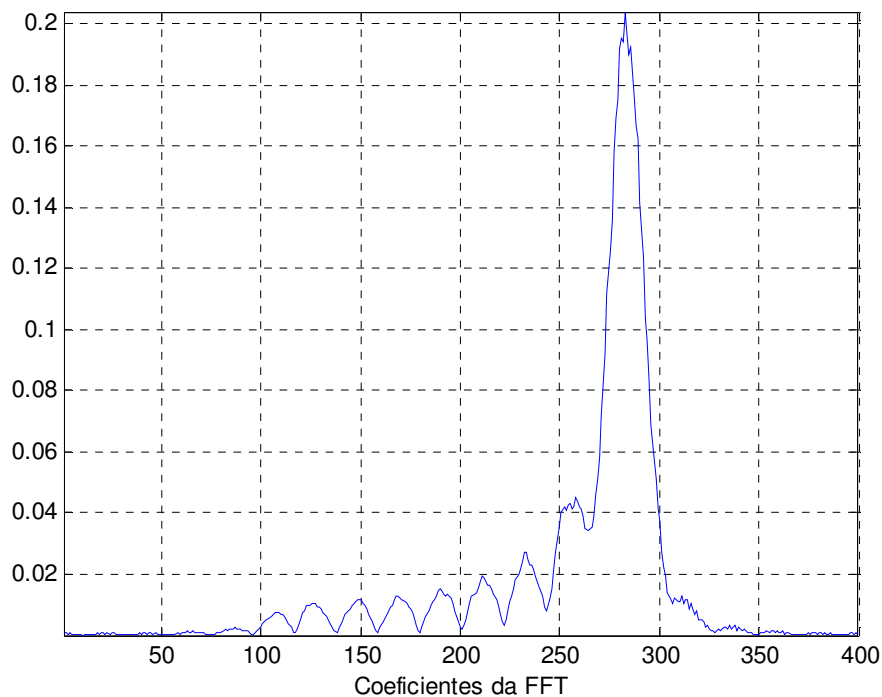
Para cada pico encontrado é chamado de candidato, em que vai ser definido um vector deslocamento para cada um que vai ser criado a partir do método descrito a seguir.

### 5.3. *Estimação da Velocidade*

#### 5.3.1. Azimute

##### 5.3.1.1. Geração das Sub-Imagens

Para a geração das sub-imagens primeiro é necessário calcular o espectro de doppler dos dados comprimidos em range através da FFT da direcção de azimute. De seguida este é dividido em varias bandas conforme o pretendido, e para cada uma delas é formada uma imagem.



**Figura 31 - Espectro de frequência de uma sub-imagem**

De referir que a largura de banda de cada sub-imagem tem que ser escolhida com algum cuidado, pois se for muito baixa a resolução em azimute vai baixar prejudicando assim o desempenho do sistema. Ao passo que se for muito elevada corre-se o risco de os alvos que se desloquem a uma elevada velocidade apareçam desfocados.

### 5.3.1.2. Processo de cálculo da velocidade

Criado o vector deslocamento em azimuth ( $\Delta x$ ) de cada candidato e geradas as sub-imagens, o vector deslocamento será calculado com recurso a um algoritmo proposto em [10] que estima o deslocamento de um candidato entre duas sub-imagens consecutivas:

- Para obter o vector deslocamento é posicionada uma janela na imagem  $I_2$  para que o candidato esteja situado no centro desta;
- Depois na imagem  $I_1$ , uma outra janela é colocada na mesma posição de forma a encontrar o mesmo candidato que foi identificado em  $I_2$ , sendo que a diferença entre as duas janelas é o vector deslocamento do candidato.

A componente da velocidade em azimuth é calculada através do vector deslocamento estimado, em que a diferença de tempo entre duas sub-imagens consecutivas é dada por, [10]

$$\Delta t = \frac{\Delta \theta R_0}{V_{AX}}, \quad (5.1)$$

Em que  $\Delta \theta = \theta_i$ ,  $\sin \theta_i \ll 1$ ,  $V_{AX}$  representa a velocidade da plataforma e  $R_0$  a altura da plataforma ao chão.

Cada sub-imagem representa a visão da mesma área mas de diferentes ângulos, então estes vão ser definidos da seguinte forma, [10]

$$\theta_i = \sin^{-1} \frac{f_{Li} \lambda}{2V_{AX}}, \quad (5.2)$$

em que  $f_{Li}$  representa a frequência central de cada sub-imagem.

Calculada a diferença de tempo entre sub-imagens, a velocidade na direcção de azimuth vem então, [10]

$$V_{txObs} = \frac{\Delta x \cdot \delta_x}{\Delta t}, \quad (5.3)$$

em que  $\delta_x$  representa o espaçamento de cada pixel na direcção de azimute.

Esta velocidade não representa a real porque os objectos não aparecem nas diferentes imagens na posição correcta. Assim, como demonstrado em [10] a velocidade real é apenas metade da velocidade estimada em (5.4). Logo a velocidade real vem,

$$V_{txext} = \frac{V_{txObs}}{2} = \frac{\Delta x \cdot \delta_x}{2\Delta t}. \quad (5.4)$$

Substituindo em (5.1), (5.2) e de seguida em (5.4) a componente da velocidade em azimute vem então,

$$V_{txext} = \frac{\Delta x \cdot \delta_x \cdot V_{AX}^2}{\Delta f_{Li} \cdot \lambda \cdot R_0}. \quad (5.5)$$

### 5.3.2. Range

Para o calculo da velocidade em *range* tira-se partido da Transformada de Radon que permite detectar o rasto da embarcação [2]. Como a embarcação já foi detectada pode-se estimar a distância ao seu rasto. Assim, consegue-se relacionar esta distância com a velocidade em *range*, através de

$$V_r = \frac{\Delta a \delta_y V_{AX}}{R_0}, \quad (5.6)$$

em que  $\Delta a$  é o deslocamento que o alvo móvel sofre da sua rota, e  $\delta_y$  representa o espaçamento de cada pixel na direcção de *range* [24].

Para a detecção e estimação da posição do rasto utilizou-se a Transformada de Radon, que permite, através da geometria descrita na Figura 32 estimar a posição deste.

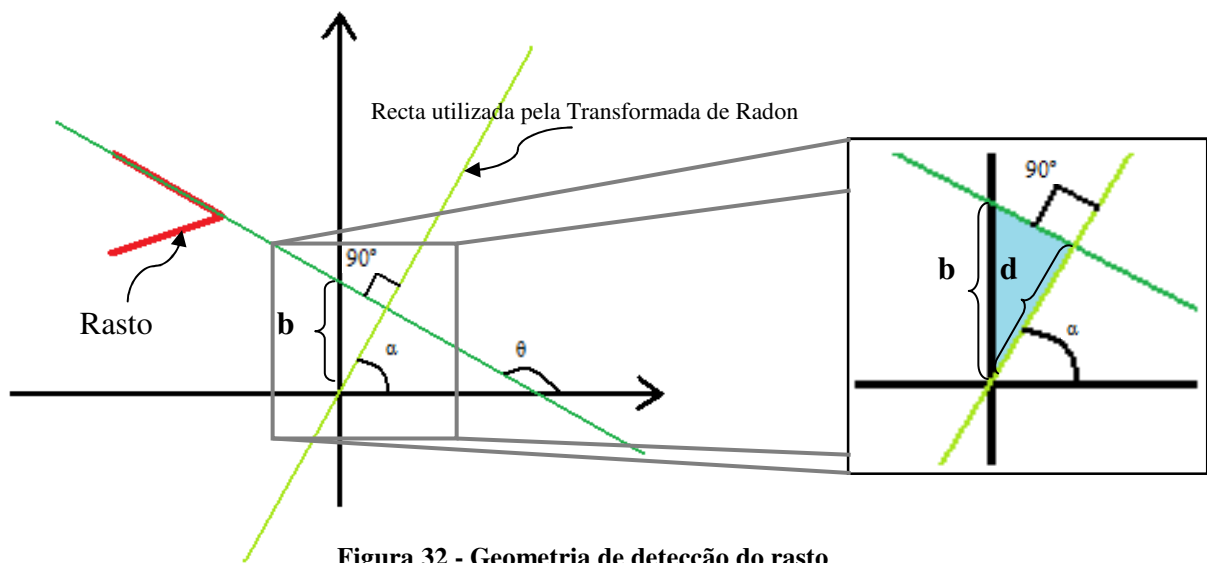


Figura 32 - Geometria de detecção do rasto

A Transformada de Radon aplicada a uma imagem vai procurar a melhor razão de semelhança entre a imagem e as rectas que passam na origem dos eixos, situados no centro da imagem. É desta forma que se consegue encontrar onde o rasto se situa, pois a Transformada de Radon retorna o ângulo ( $\alpha$ ) da recta que teve uma maior relação de semelhança com a imagem, bem como a distância ( $d$ ) que vai desde a origem dos referenciais até ao ponto em que a recta utilizada pela Transformada se cruza com uma recta perpendicular que contém parte do rasto da embarcação, como se pode verificar na Figura 32.

Obtidos estes dois valores é possível então estimar a posição do rasto, ou seja, pode-se calcular o ângulo que cada braço do rasto faz com o eixo dos  $xx$  somando a  $\alpha$   $90^\circ$ , e pode-se calcular o ponto ( $b$ ) em que a recta que contém o rasto intersecta o eixo dos  $yy$ , permitindo assim estimar uma equação para esta recta.

$$y = mx + b \quad (5.7)$$

$$m = \tan \theta, \quad (5.8)$$

em que  $\theta$  é o ângulo que o braço do rasto faz com o eixo dos  $xx$  e

$$b = \frac{d}{\cos(90-\alpha)}, \quad (5.9)$$

A expressão (4.9) é obtida através da análise do triângulo rectângulo a azul claro presente na Figura 32, ou seja, tendo um cateto (d) e o ângulo que este faz com a hipotenusa ( $90 - \alpha$ ) consegue-se estimar a hipotenusa que corresponde ao valor da ordenada na origem na equação da recta.

Para o outro braço do rasto o processo de identificação é o mesmo, ou seja, são calculados os mesmos valores e definida uma recta que caracteriza o rasto.

Definidas as duas rectas que caracterizam o rasto basta igualar estas, e o resultado vai permitir saber com algum grau de certeza a posição correcta do rasto. Com o rasto identificado através do processo descrito e a embarcação através do processamento em azimute consegue-se estimar o deslocamento que esta sofreu do rasto. Por fim aplicando a expressão (5.6) pode-se estimar a velocidade em range.

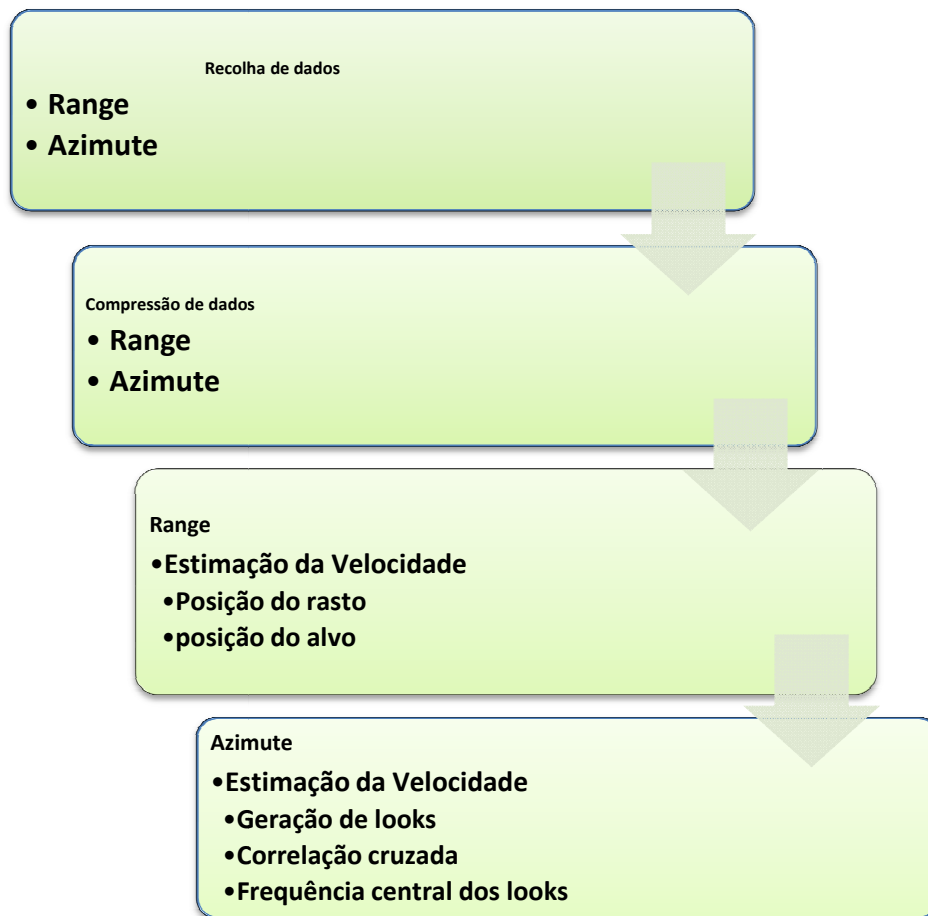
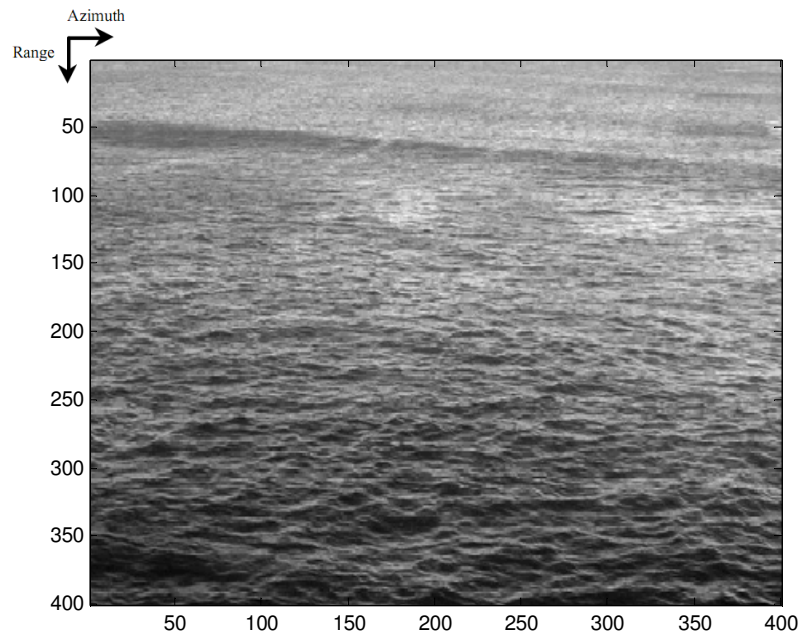


Figura 33 - Estrutura da Abordagem proposta

Na Figura 33 encontra-se descrito em diagrama o que foi descrito neste capítulo, ou seja, os passos necessários para estimar a posição e a velocidade das embarcações.

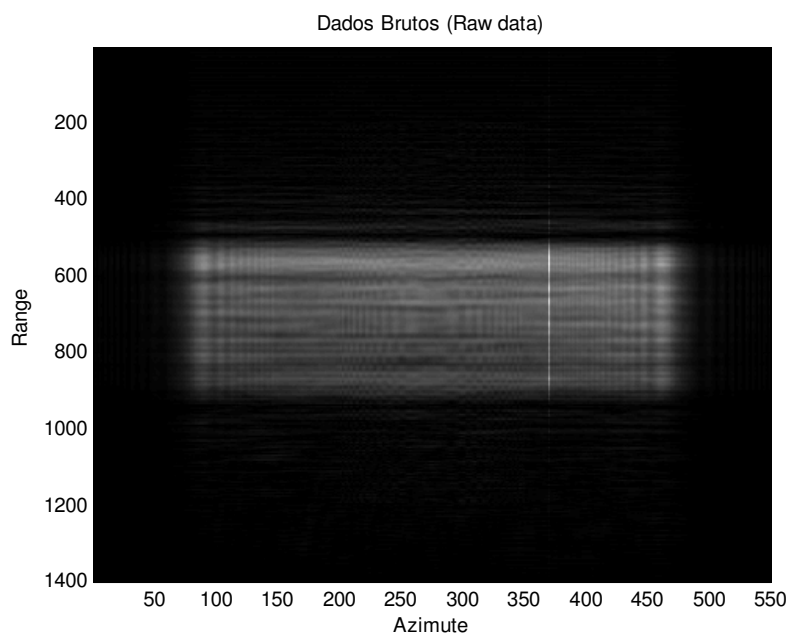
#### 5.4. Resultados

A técnica descrita foi aplicada aos dados brutos (*RawData*) gerados por um simulador (desenvolvido no contexto deste trabalho) de uma determinada imagem, que contém uma embarcação e o seu respectivo rasto. Assim simulou-se a imagem da Figura 34 em que representa o oceano. Sobre esta vai ser colocada uma embarcação com e sem velocidade onde se poderá verificar o aparecimento do rasto provocado pela velocidade da embarcação.

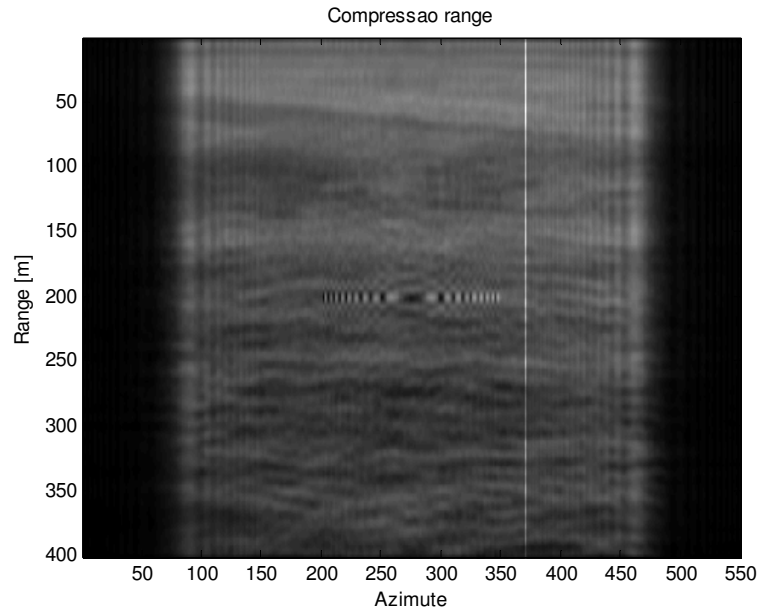


**Figura 34 - Imagem simulada**

Depois de simulada a imagem foi colocada uma embarcação sem velocidade. De seguida são mostrados os dados brutos gerados, bem como as duas compressões efectuadas para reconstruir o sinal.

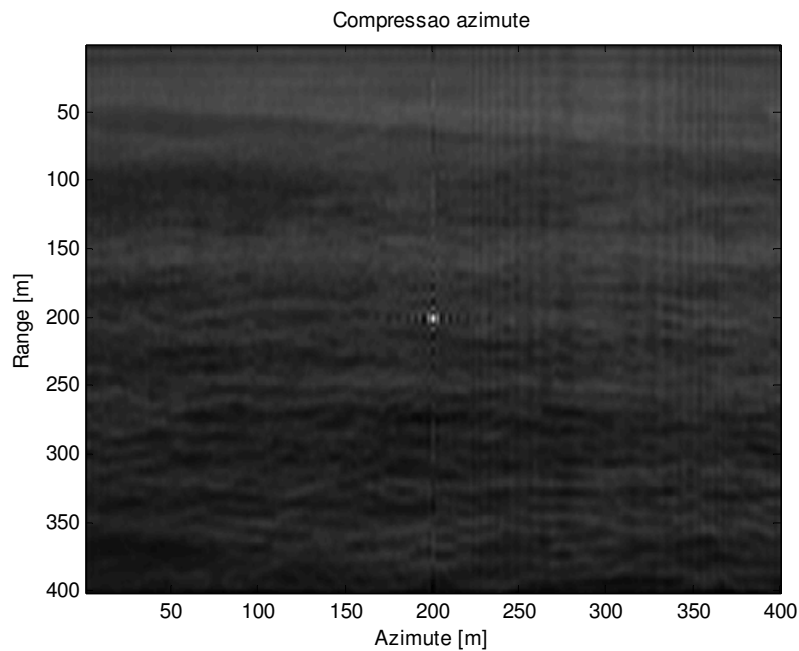


**Figura 35 - Dados Brutos gerados com alvo sem velocidade**



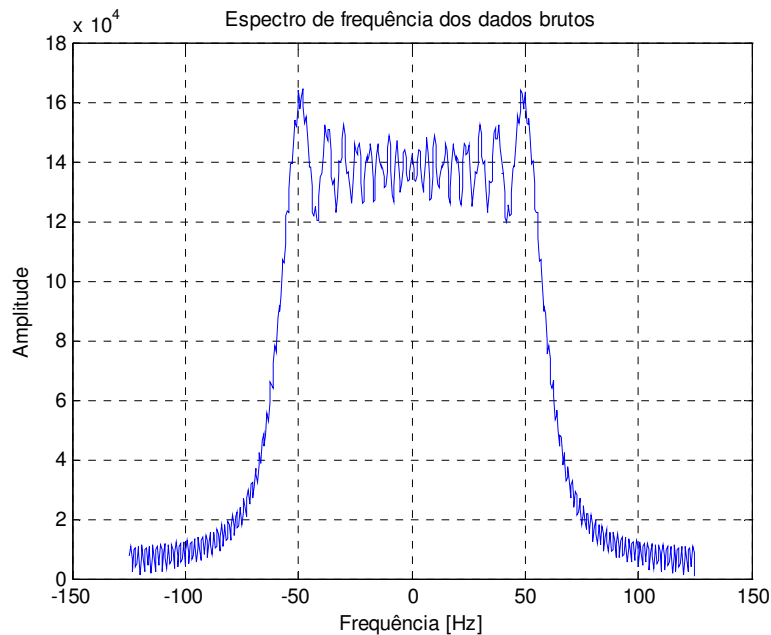
**Figura 36 - Compressão em Range para um alvo sem velocidade**

Na Figura 35 e mais em pormenor na Figura 36 pode-se verificar a existência da assinatura de um objecto no meio do *clutter*. De seguida é feita a compressão em azimuth para que se possa obter uma imagem desta zona do oceano onde se encontra um objecto sem velocidade.



**Figura 37 - Imagem reconstruída de um alvo sem velocidade**

Por análise da Figura 37 verifica-se a existência de um objecto em aproximadamente 200m na direcção de azimute.



**Figura 38 - Espectro de frequência dos dados brutos na direcção de range**

Na Figura 38 encontra-se representado o espectro de frequência dos dados brutos na direcção de range, onde se pode verificar que este se encontra centrado em 0, o que significa que se está na presença de um alvo estático.

Colocando o alvo com velocidade, vai originar o aparecimento de um rasto atrás deste, o que vai facilitar o cálculo da velocidade em range, como se vai verificar mais a frente. Embora a embarcação tenha velocidade não nula, o rasto nunca se desloca, ou seja, na imagem reconstruída este não aparece deslocado independentemente da velocidade. Relativamente à embarcação isto não se verifica, devido aos efeitos enunciados em capítulos anteriores.

### 5.4.1. Velocidade em Range

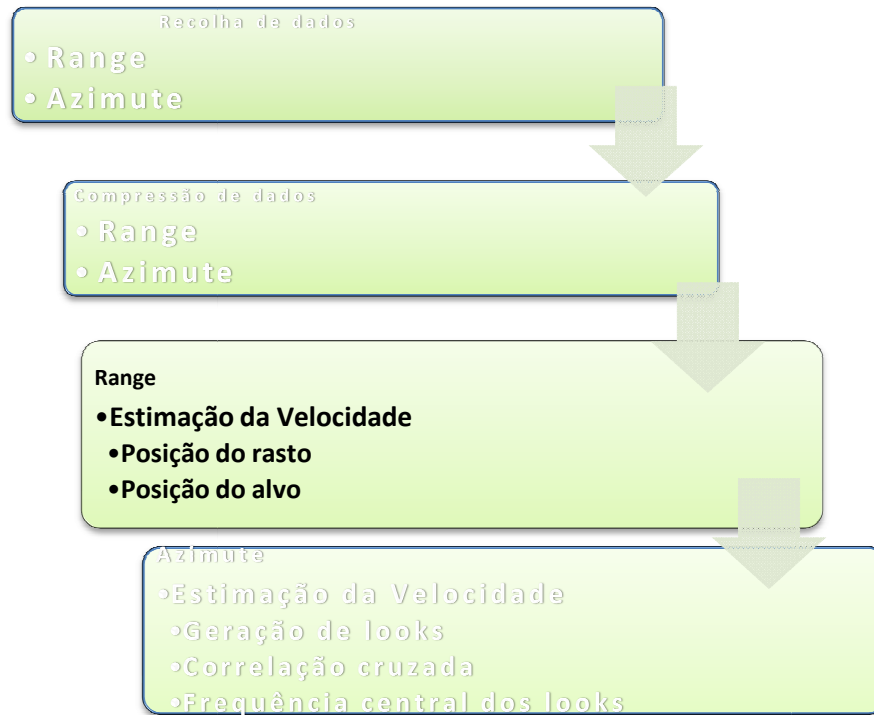


Figura 39 - Esquema de cálculo da velocidade em range

Neste subcapítulo vai-se estimar a velocidade em range de um alvo. Para esse efeito, basta calcular a posição em que o rasto se encontra, bem como o deslocamento que a embarcação sofreu devido à velocidade. O esquema de passos a seguir encontra-se descrito na Figura 39.

Para identificar e estimar a posição do rasto da embarcação recorre-se à Transformada de Radon que calcula o ângulo que uma recta perpendicular ao rasto faz com o eixo dos  $xx$ , centrado no centro da imagem. Sabendo isto, basta somar  $90^\circ$  ao valor obtido para descobrir o ângulo do rasto. Para o outro braço do rasto o processo é idêntico.

O método para estimar a posição do rasto encontra-se descrito na secção 5.3.2 deste capítulo.

Para estimar a velocidade em range com base no método proposto basta conhecer os parâmetros da missão SAR apresentados na Tabela 3:

**Tabela 3 - Parâmetros de simulação**

Velocidade da Plataforma ( $V_{AX}$ )	250 m/s
Altura da Plataforma ( $R_0$ )	10 000 m
Espaçamento em Range ( $\delta_y$ )	1 m
Frequência ( $f_c$ )	5 GHz

Com estes parâmetros definidos, a velocidade máxima possível é dada pela seguinte expressão,

$$V_{r_{max}} = \frac{PRF \times c}{4 \times f_c} \quad (5.10)$$

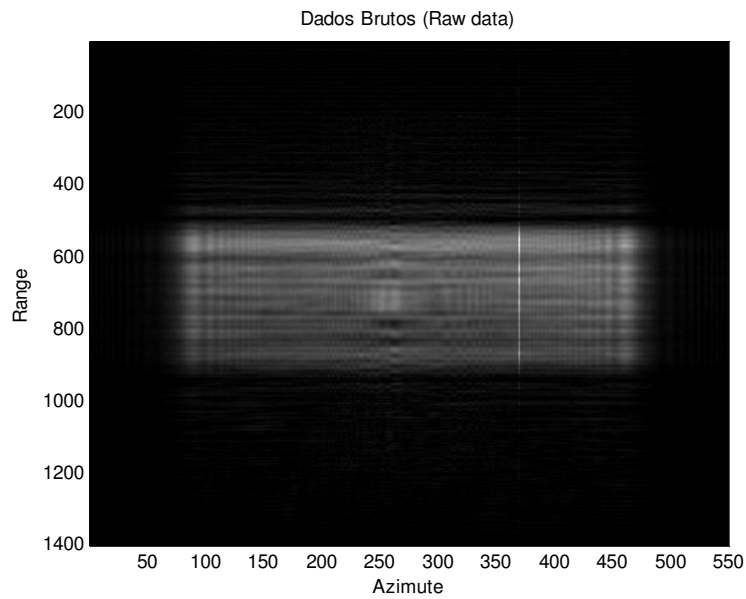
$$PRF(Pulse Repetition Frequency) = V_{AX} \times \delta_y \quad (5.11)$$

Aplicando (5.11) em (5.10) constata-se que a velocidade máxima admissível em range é de 3.75 m/s (13.5 km/h).

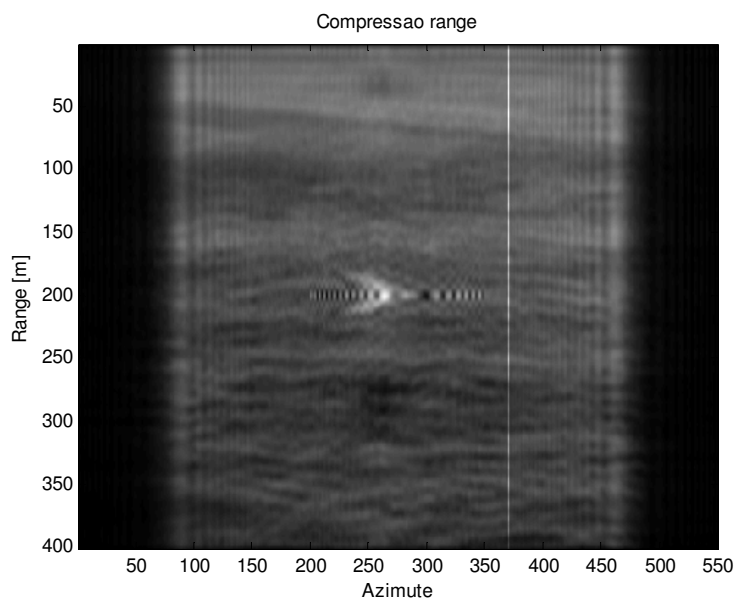
Com os parâmetros utilizados na simulação verifica-se que por cada 0.28 m/s (1 km/h) a embarcação desloca-se 11 pixéis, como é visível na Figura 42.

**Simulação 1:**

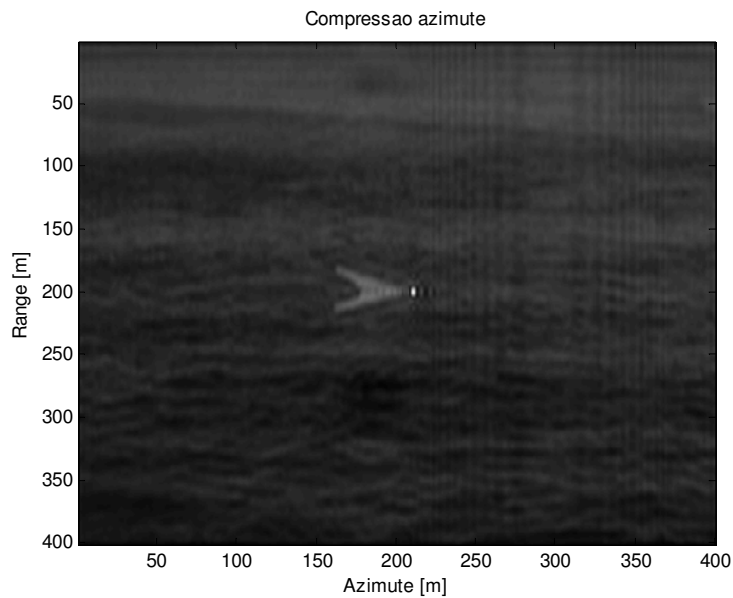
Nesta simulação é usado um alvo pontual com velocidade de 1 km/h, vão ser adquiridos os dados brutos e calculada a velocidade a partir destes utilizando o método descrito atrás.



**Figura 40 - Dados brutos - simulação 1**

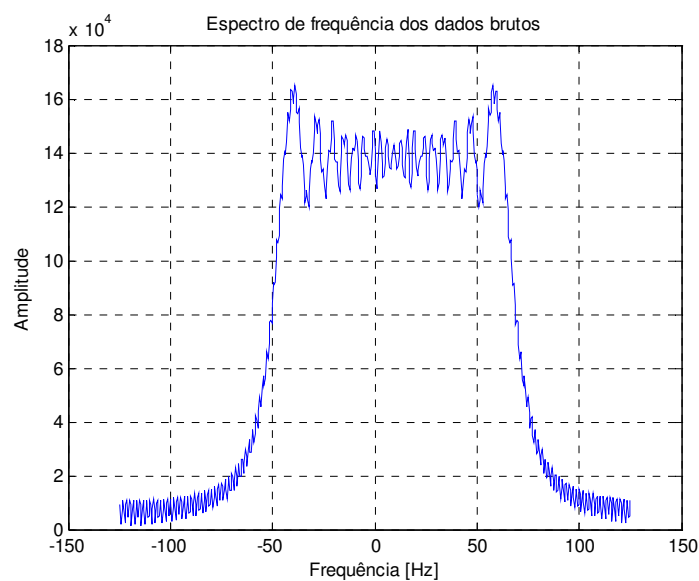


**Figura 41 - Dados comprimidos em range – Simulação 1**



**Figura 42 – Imagem reconstruída – Simulação 1**

Depois de analisada a Figura 42 com o método proposto verifica-se que o rasto se encontra na posição 200m na direcção de range e 199m na direcção de azimuth. No que respeita ao alvo encontra-se na posição 210m, logo verifica-se um deslocamento deste face ao rasto na direcção de azimuth, porque a velocidade em range provoca o aparecimento de um deslocamento do alvo na direcção de azimuth. Isto vai permitir concluir que se desloca a uma velocidade de aproximadamente 1km/h.

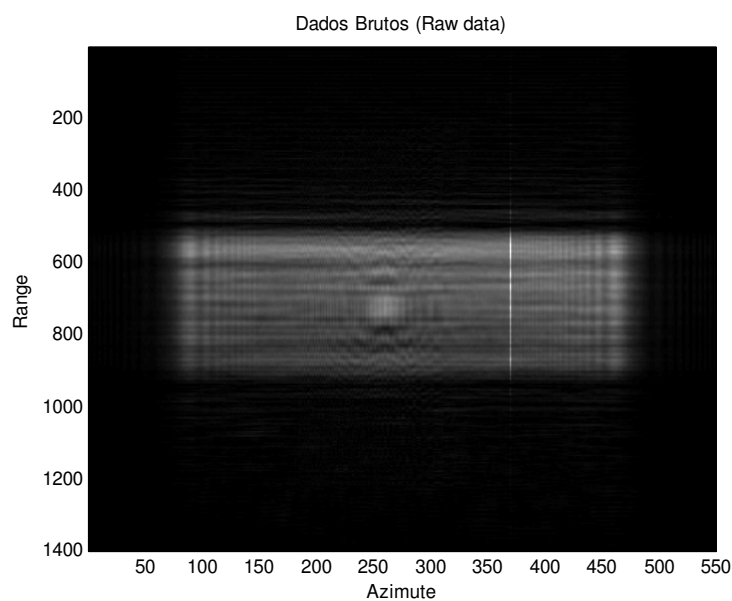


**Figura 43 - Espectro de frequência dos dados brutos com velocidade em range**

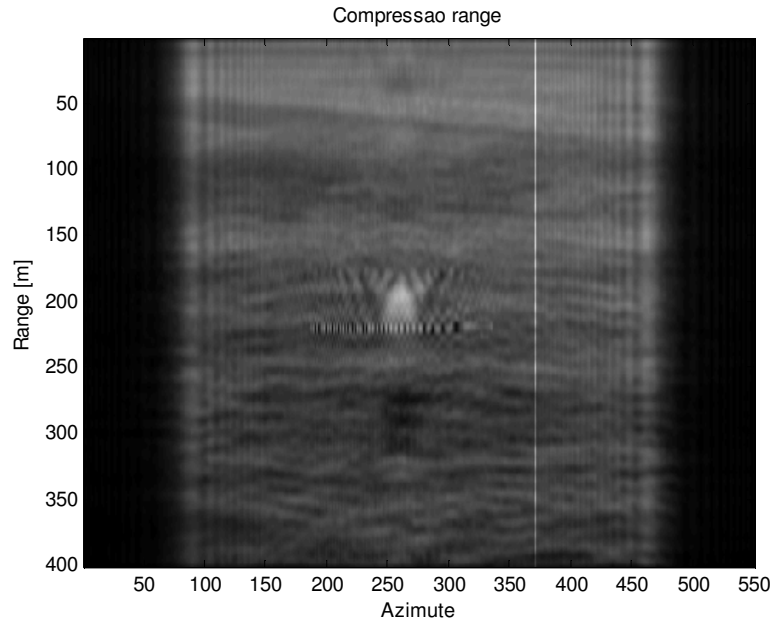
Na Figura 43, ao contrário da Figura 38 pode-se verificar que existe um desvio de frequência devido à velocidade em range. Pode-se verificar que o espectro encontra-se deslocado de 0 Hz devido a velocidade que o alvo possui. É com este desvio que vai ser possível verificar se a velocidade máxima admissível em range está a ser ultrapassada, como se vai poder constatar mais à frente neste capítulo.

### Simulação 2:

Nesta simulação foi colocado o alvo a deslocar-se noutro sentido e calculada a velocidade a que se desloca.

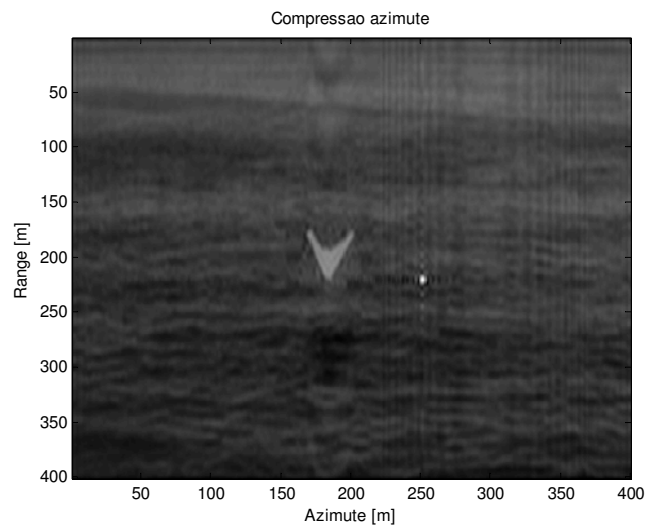


**Figura 44 - Dados brutos simulação 2**



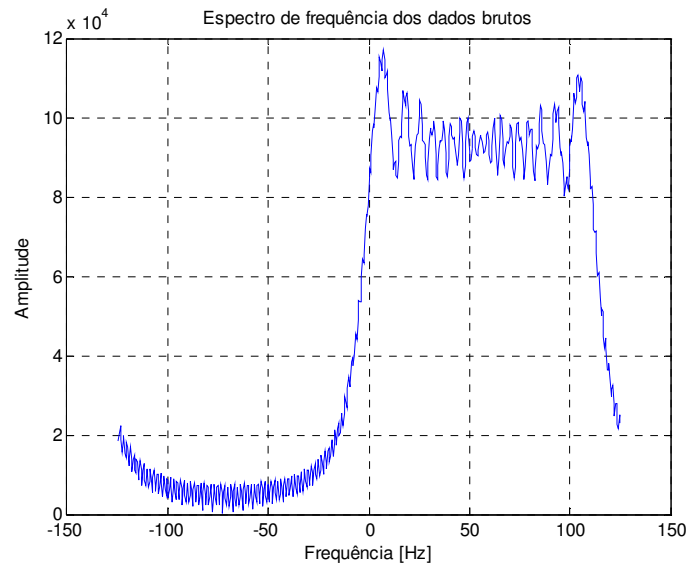
**Figura 45 - Dados comprimidos em range - simulação 2**

Da Figura 45 pode-se verificar que apesar do alvo de deslocar noutra sentido os dados encontram-se espalhados na direcção de azimuth, isto devido à velocidade do alvo. Este efeito ir-se-á verificar em todas as simulações como se poderá comprovar.



**Figura 46 - Imagem reconstruída - simulação 2**

Na Figura 46 pode-se verificar o deslocamento que o alvo teve da sua rota, assim a velocidade estimada é de 6.6 km/h, em que a velocidade simulada foi de 6 km/h.

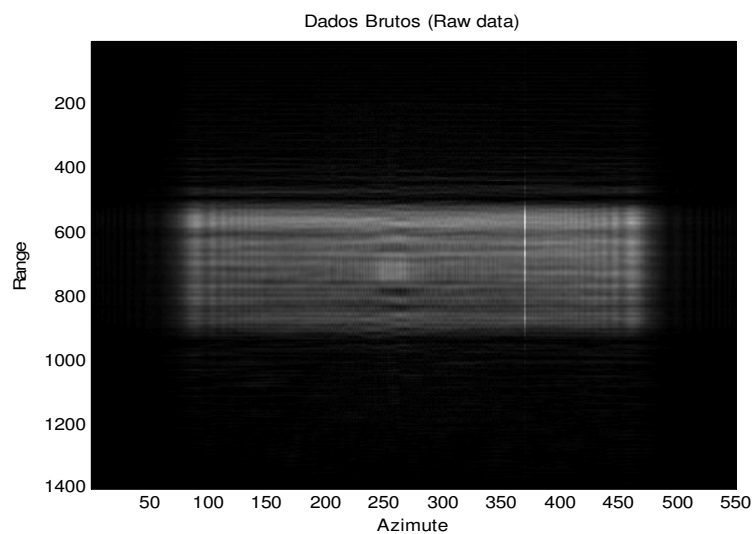


**Figura 47 - Espectro de frequência dos dados brutos - simulação 2**

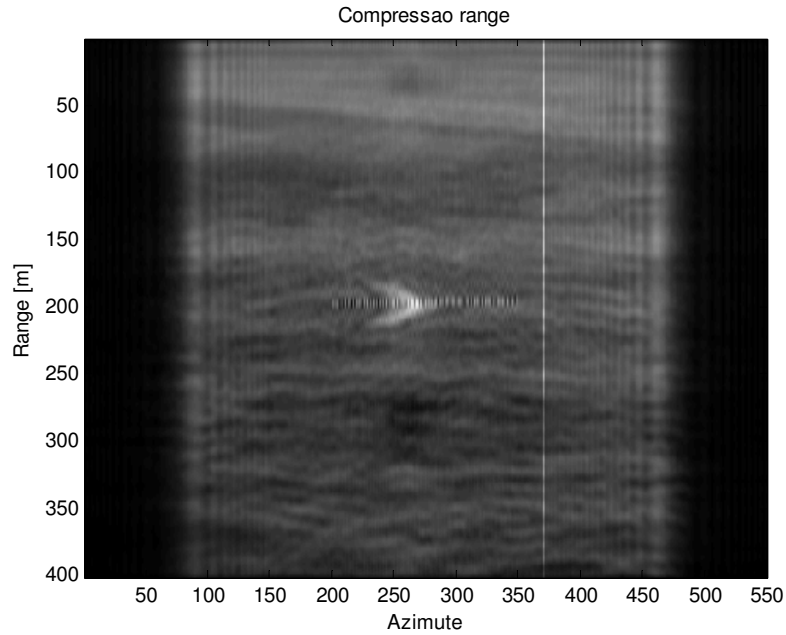
Na Figura 47 pode-se verificar o desvio de frequência provocado pela velocidade.

### **Simulação 3:**

Nesta simulação mostra-se o limite de velocidade máximo admissível em range, em que a velocidade mais uma vez é calculada através do método proposto.

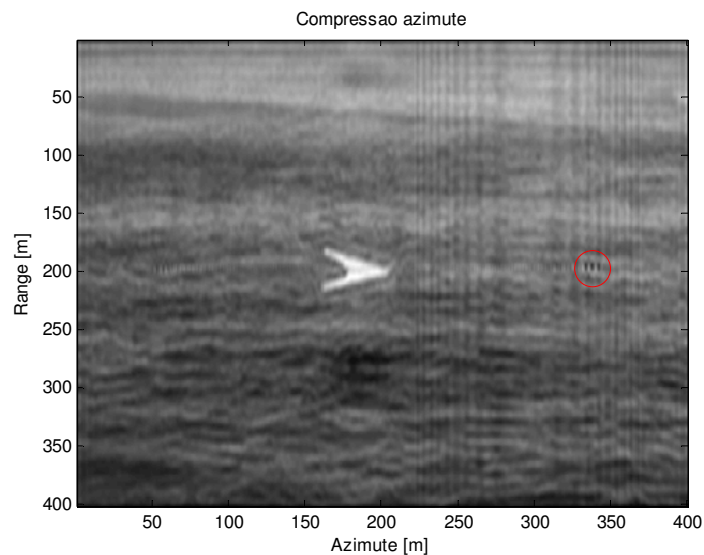


**Figura 48 - Dados brutos com velocidade máxima admissível – Simulação 3**



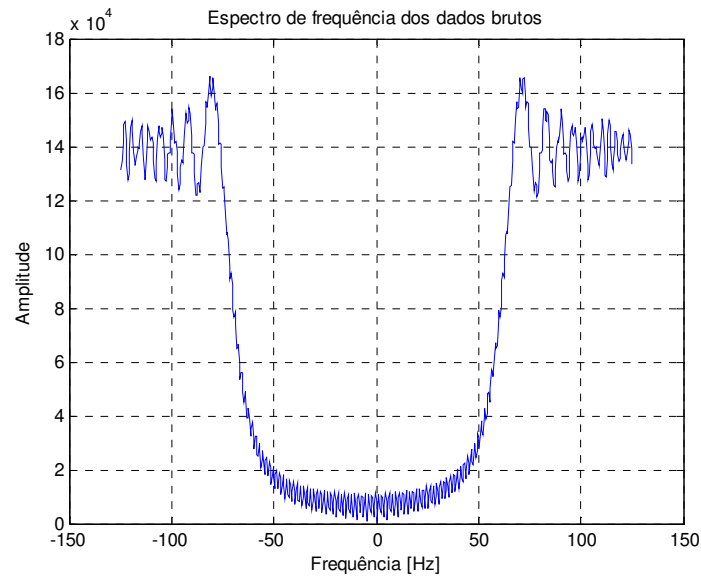
**Figura 49 - Dados comprimidos em range de um alvo com velocidade máxima – Simulação 3**

Comparando a Figura 41 com a Figura 49 pode-se verificar que os dados comprimidos em range relativos apenas ao alvo em movimento da primeira estão mais concentrados que na segunda. Uma vez que a velocidade é mais elevada na segunda, logo verifica-se um espalhamento dos dados ao longo da direcção de azimute.



**Figura 50 - Imagem reconstruída de um alvo com velocidade máxima – Simulação 3**

Aplicado o método proposto constata-se que a velocidade que o alvo se desloca é de 13.2 km/h.



**Figura 51 - Espectro de frequência dos dados brutos de um alvo com velocidade máxima**

Na Figura 51 pode-se verificar que o espectro começa a perder a forma que se verifica na Figura 43, isto devido a velocidade do alvo e o desvio de frequência que esta impõe no sinal. Assim pode-se verificar que a velocidade máxima foi atingida, uma vez que como o espectro da FFT se encontra espalhado de  $[-\pi;\pi]$  se a velocidade for muito elevada e ultrapassar o limite imposto pelo PRF, vai provocar um desvio de frequência superior a  $\pi$ , daí que se pode verificar que o espectro começa a aparecer na zona negativa e a desaparecer da zona positiva. Isto mostra que o desvio devido à velocidade começa a ser superior a  $\pi$  e começa a não ser possível estimar a velocidade correctamente.

Na figura abaixo encontra-se esquematizado o processo de estimação da velocidade em range, que vai desde a obtenção dos dados brutos até ao cálculo da posição quer do rasto quer do alvo, que vão permitir o cálculo da velocidade.

Os resultados da estimação da velocidade em range para outras velocidades encontram-se na Tabela 4.

**Tabela 4 - Velocidades estimadas**

Velocidade Real (km/h)	Velocidade Estimada (km/h)
1	1.10
2	2.20
3	3.40
4	4.50
5	5.60
10	11.20
13	13.20

Através da análise da Tabela 4 verifica-se que com o método proposto permite obter resultados satisfatórios, apesar de apenas ser válido para velocidades baixas com os parâmetros utilizados nesta simulação. Este limite pode ser aumentado se forem utilizados outros valores como parâmetros de missão.

### 5.4.2. Velocidade em Azimute

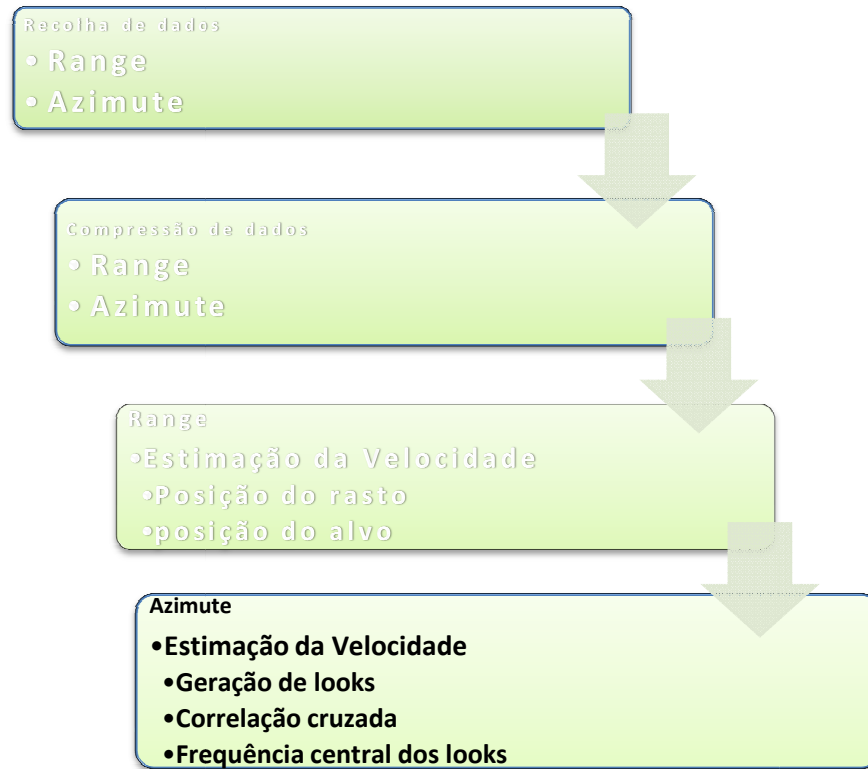
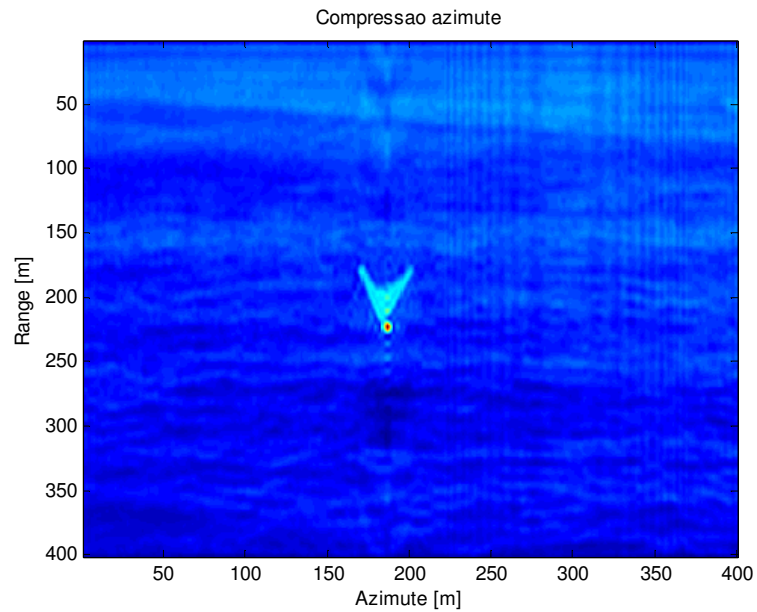


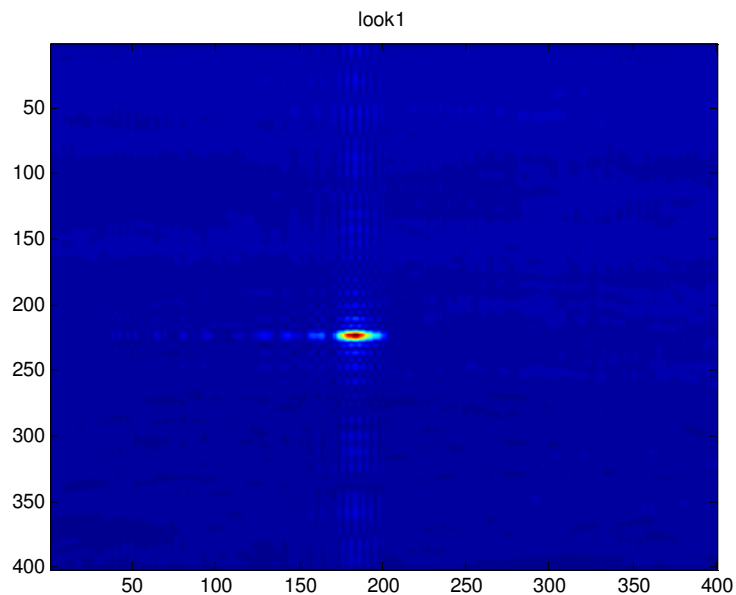
Figura 52 - Esquema de estimação da velocidade em azimute

Para o cálculo da velocidade em azimute foram geradas sub-imagens que vão permitir calcular o deslocamento que uma embarcação apresenta entre 2 sub-imagens consecutivas. Os passos dados para o cálculo da velocidade encontram-se descritos na Figura 52.

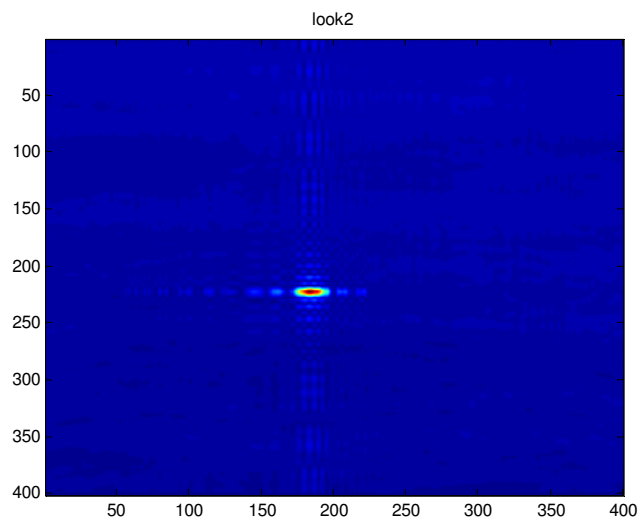


**Figura 53 - Imagem reconstruída**

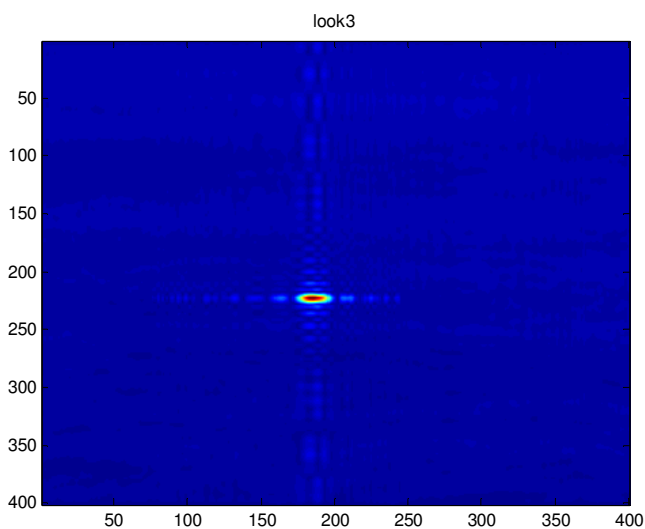
Na Figura 53 encontra-se representada a imagem reconstruída que mostra o efeito que a velocidade em azimuth provoca, ou seja, um espalhamento na direcção de azimuth, bem como um pequeno deslocamento do seu rasto. É a partir desta imagem que são geradas as sub-imagens que vão permitir estimar a velocidade em azimuth.



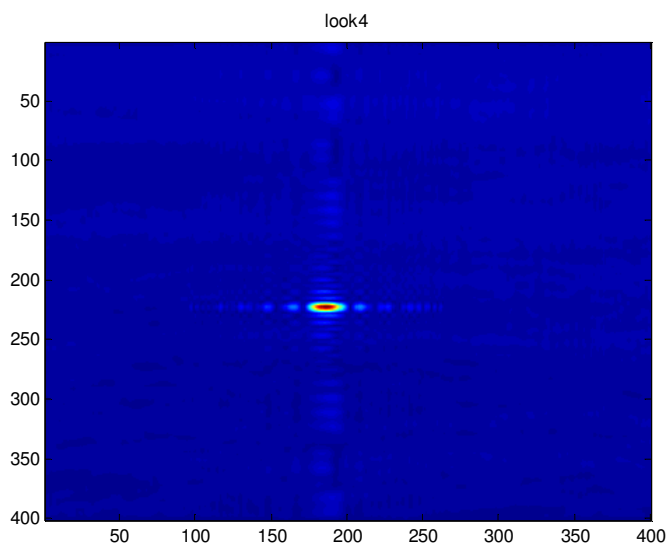
**Figura 54 - Sub-imagem gerada 1**



**Figura 55 - Sub-imagem gerada 2**

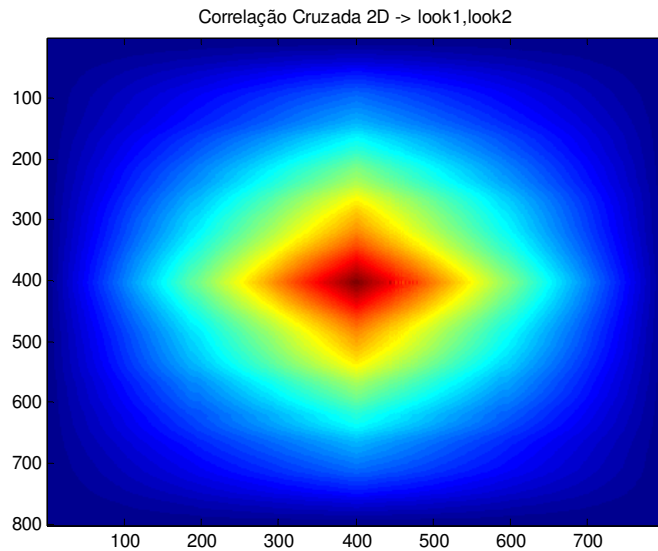


**Figura 56 - Sub-imagem gerada 3**



**Figura 57 - Sub-imagem gerada 4**

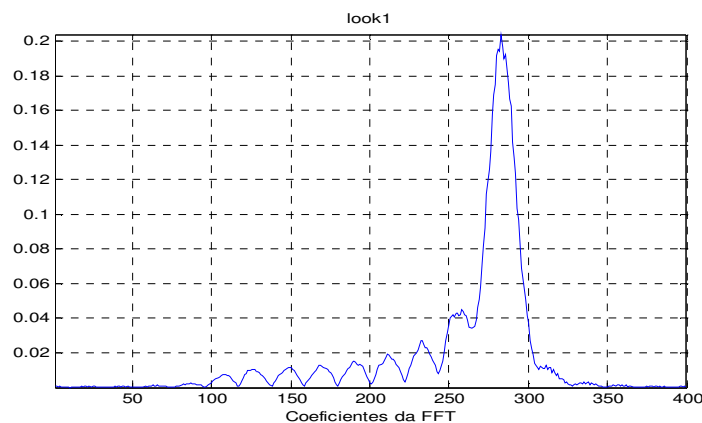
Depois de geradas as sub-imagens (Figura 54,55,56 e 57), efectua-se uma correlação cruzada entre 2 sub-imagens consecutivas.



**Figura 58 - Correlação Cruzada 2D**

Na Figura 58 pode-se verificar que o resultado da correlação cruzada encontra-se um pouco desviado do centro da imagem, que tem o dobro do tamanho de cada sub-imagem. É este desvio que vai ser usado para estimar a velocidade em azimute.

Para se poder estimar a velocidade em azimute falta apenas calcular a frequência central das sub-imagens usadas para realizar a correlação cruzada. Assim foi calculado o espectro de frequência na direcção de azimute de cada sub-imagem (Figura 59).



**Figura 59 - Espectro da frequência de uma sub-imagem**

Depois de transformado o coeficiente da FFT, correspondente ao máximo do sinal, em frequência, é possível calcular o  $\Delta f_{Li}$ , que se encontra em (5.5), para se estimar a velocidade em azimuth.

**Tabela 5 - Velocidades estimadas em azimuth**

Velocidade Real (km/h)	Velocidade Estimada (km/h)
5	6.85
10	11.21
15	13.71
20	17.14
30	24

De referir que estes resultados foram estimados a partir da aplicação de (5.5).

# Capítulo 6

## 6. Conclusão

Esta tese iniciou-se com um estudo teórico sobre o sistema de radar de abertura sintética, que permitiu conhecer o princípio de funcionamento do sistema, bem como o processamento de sinal na formação de imagem. Foi feita depois uma pesquisa sobre técnicas e abordagens existentes para a estimação de velocidades de embarcações.

Nesta tese de mestrado desenvolveu-se uma nova técnica que permite detectar e estimar a velocidade de embarcações. Esta técnica para a detecção tira partido da correlação cruzada a 2D entre duas sub-imagens geradas a partir da imagem obtida através do radar. Para a estimação da velocidade é utilizada a transformada de Radon que permite detectar rectas numa imagem. Esta é utilizada para estimar a posição do rasto que a embarcação gera à medida que se desloca. Com a posição do rasto estimada e a embarcação detectada é possível estimar a velocidade uma vez que uma embarcação a deslocar-se provoca um efeito característico deste sistema, ou seja, aparece deslocada do rasto. Assim através do deslocamento é possível estimar a velocidade na direcção de *range*. Para a velocidade em azimute é estimado o deslocamento que uma embarcação sofre entre duas sub-imagens consecutivas. Calculando-se a frequência central destas é então possível estimar a velocidade em azimute.

Para testar a técnica proposta foi desenvolvido um simulador que gera os dados brutos de uma imagem que simula um pedaço de oceano, faz a compressão destes dados nas

duas direcções, range e azimute, e por fim gera uma imagem que representa a imagem simulada mas com as características e efeitos do sistema e velocidade.

No que respeita a resultados obtidos pode-se concluir que a técnica proposta apresenta resultados bastante satisfatórios. Na velocidade em range estes são ainda melhores, uma vez que se conseguem estimativas bastante próximas da velocidade real. A única limitação apresentada é a velocidade máxima admissível ser dependente do PRF.

Na estimação da velocidade em azimute, os resultados são aceitáveis mas com um erro superior ao obtido em *range*. Isto devido ao facto de a velocidade em azimute provocar desvios muito pequenos face a variações de velocidade. Assim é mais vulnerável ao aparecimento de erro no cálculo quer da frequência central das sub-imagens quer no cálculo da posição do alvo.

Como comentário final pode-se concluir que os objectivos propostos no início desta tese foram de um modo geral conseguidos e comprovados.

### ***6.1. Trabalho Futuro***

Como trabalho futuro sugere-se que o simulador evolua para uma situação em que se usa dados reais de um satélite, bem como seja possível simular um cenário em que varias embarcações estejam presentes.

Relativamente ao método proposto e à estimação da velocidade em azimute, uma melhoria na detecção do deslocamento podia fazer com que o erro da velocidade estimada relativamente à real baixasse.



# Apêndice A

## *A. Transformada de Radon*

Nesta secção é descrita a definição e as características da Transformada de Radon, bem como o princípio de funcionamento e a forma de abordagem a uma imagem a ser processada.

- **Definição da Transformada de Radon**

A transformada de radon num espaço euclideano a duas dimensões pode ser definida da seguinte forma:

$$\check{f}(\theta, \rho) = \mathfrak{R}\{f\} = \iint_D f(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dy dx \quad (\text{A.1})$$

Em que  $D$  representa todo o plano  $x - y$  da imagem,  $f(x, y)$  a intensidade da imagem normalizada entre 0 e 1 na posição  $(x, y)$ ,  $\delta$  a função dirac,  $\rho$  a distância desde a origem ate à recta na direcção perpendicular a esta e  $\theta$  o ângulo que a recta perpendicular à recta em estudo faz com o eixo dos  $xx$ .

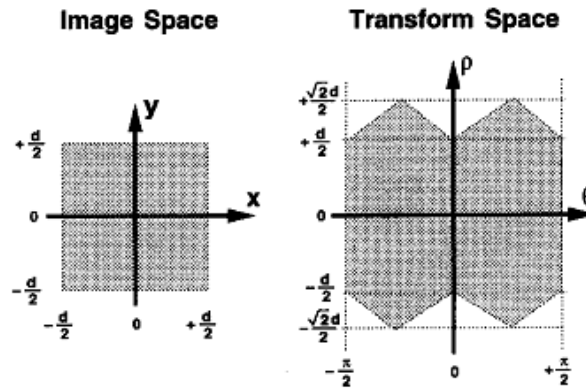


Figura 60 - Transformada de Radon, extraído de [25]

- **Propriedades da transformada de radon**

- 1) Se  $f(x,y)$  esta concentrado num ponto  $(x_0, y_0)$  então  $\check{f}(\theta, \rho)$  é diferente de zero ao longo da curva sinusoidal  $\rho = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta$ .
- 2) Um determinado ponto  $(\theta_0, \rho_0)$  no domínio da transformada corresponde a uma linha no plano  $x - y$  definido por  $\rho_0 = x_0 \cos \theta_0 + y_0 \sin \theta_0$ .
- 3) Pontos colineares no plano  $x - y$  ao longo de uma linha parametrizada por  $\theta_0$  e  $\rho_0$  representam curvas sinusoidais no plano  $\theta - \rho$ , e todas estas curvas se intersectam no ponto  $\theta_0, \rho_0$ .
- 4) Pontos ao longo da curva definida por  $\rho = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta$  no plano  $\theta - \rho$ , representam linhas no plano  $x - y$  e todas se intersectam no ponto  $x_0, y_0$ .

Assim a transformada deve conter um pico por cada linha contida na imagem, ou por cada zona que seja mais brilhante que o seu contorno.

## Bibliografia

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Radar>
- [2] TUNALEY, James K. E. *The Estimation of Ship Velocity from SAR Imagery*. Goescience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Vol. 1, pages 191 – 193, 21-25 July 2003.
- [3] MUNSON, David C. VICENTIN, Robert L. *A signal processing view of strip-mapping Synthetic Aperture Radar*. IEEE Transactons on Acoustics, Speech and Signal Processing. Vol. 37, NO 12, pages 2131–2147, December 1989.
- [4] SOUMECH, Mehrdad. *Reconnaissance with Ultra Wideband UHF Synthetic Aperture Radar*. IEEE Vol. , pages 21-40, July 1995.
- [5] CHAPTER3.pdf. *Introduction to Synthetic Aperture Radar and its Application to the Potato Crop*
- [6] BARTON, David K. LEONOV, Sergey A. *Radar Technology Encyclopedia (Electronic Edition)*. Londres, Artech House, 1998.
- [7] ESA, *ASAR Product Handbook*. 27 de Fevereiro 2007. <http://envisat.esa.int/handbooks/asar/CNTR.htm>
- [8] LACOME, Philippe. HARDANGE, Jean-Philippe. MARCHAIS, Jean-Claude. NORMAT, Eric. *Air and Spaceborne Radar Systems: An Introduction*. 2001
- [9] OUCHI, Kazuo. *Detection of Ships Using Cross-Correlation of Split-Look SAR Images*. Goescience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. Vol. 4, pages 1807 – 1809, 9-13 July 2001.

- [10] KIRSCHT, Martin. *Detection and Velocity Estimation of Moving Objects in a Sequence of Single-Look SAR Images*. Goescience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS '96. Vol. 1, pages 333 – 335, 27-31 July 1996.
- [11] KIRSCHT, Martin. *Detection, Velocity Estimation and Imaging of Moving Targets with Single-Channel SAR*. EUSAR'98, pages 587-590
- [12] [http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/glossary/index\\_e.php?id=2928](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/glossary/index_e.php?id=2928)
- [13] LÁZARO, Angela. *Plataforma Multicanal de Sonar de Abertura Sintética*. Novembro 2007.
- [14] RODRIGUES, José. *Plataforma Multicanal de Sonar de Abertura Sintética*. Novembro 2007.
- [15] DIAS, Inene. *Sonar de abertura sintética*. Novembro 2006.
- [16] <http://www.infosar.co.uk/sar/sar.html>
- [17] <http://www.stormingmedia.us/68/6860/A686074.html>
- [18] <http://en.wikipedia.org/wiki/Radar>
- [19] MARQUES, Paulo. DIAS, José M. B. *SAR Simulation in a Scene Containing Moving Targets*, Proc Conf. on Telecommunications - ConfTele, Sesimbra, Portugal, Vol. 1, pp. 693 - 697, April, 1999.
- [20] [http://br.geocities.com/slbz2002/hpeja/etapa5b\\_arquivos/image003.gif](http://br.geocities.com/slbz2002/hpeja/etapa5b_arquivos/image003.gif)
- [21] MARQUES, Paulo. *2005 talk\_SAR\_isel\_17\_Fev\_2005\_static.pdf*
- [22] MARQUES, Paulo. *Phd Thesis*. Julho 2004

- [23] MARQUES, Paulo. DIAS, José M. B. *Moving Target Trajectory Estimation in SAR Spatial Domain Using a Single Sensor*, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 43, No. 3, pp. 864 - 874, July, 2007.
- [24] Michael, Eineder. e Richard, Bamler. e Steffen, Suchandt. *A Method for Optimal GMTI Focussing and Enhanced Visual Evaluation*.
- [25] Anthony C. Copeland, Gopalan Ravichandran e Mohan M. Trivedi. *Localized Radon Transform-Based Detection of Ship Wakes in SAR Images*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 33, No 1, pp. 35 – 45, January, 1995.
- [26] Roger J. Sullivan, John N. Entzminger. *Microwave Radar, imaging and advanced concepts*. Londres, Artceh House, 2000.