



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Felipe Marques dos Santos

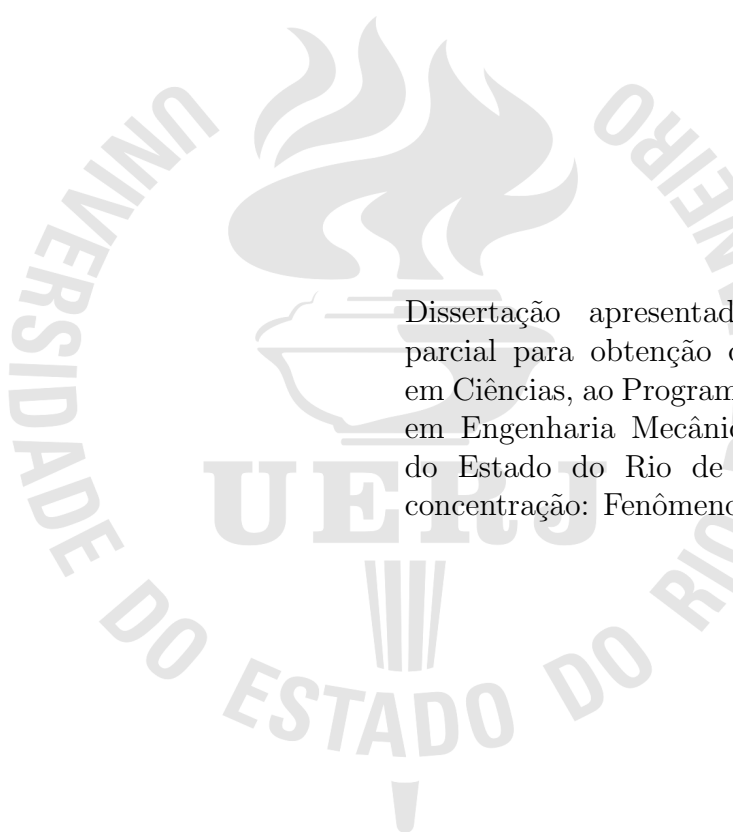
**Acoplamento de Simulador de imagens SAR a Interpretador
MPI para estimação do espectro direcional de ondas**

Rio de Janeiro

2012

Felipe Marques dos Santos

**Acoplamento de Simulador de imagens SAR a Interpretador MPI para
estimação do espectro direcional de ondas**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Fenômenos de Transporte.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Mariano Paes de Carvalho Filho

Orientador: Prof. Dr. Nelson Violante de Carvalho

Rio de Janeiro

2012

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S237

Santos, Felipe Marques

Acoplamento de Simulador de imagens SAR a Interpretador MPI para estimação do espectro direcional de ondas / Felipe Marques dos Santos. – 2012.

105 f.

Orientadores: Luiz Mariano Paes de Carvalho Filho;
Nelson Violante de Carvalho.

Dissertação(Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Mecânica. 2. Synthetic Aperture Radar - Dissertações. 3. Mecânica dos Fluidos - Dissertações. 4. Sensoriamento remoto - Oceano. I. Mangiavacchi, Norberto. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 621:528.8

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Felipe Marques dos Santos

**Acoplamento de Simulador de imagens SAR a Interpretador MPI para
estimação do espectro direcional de ondas**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Fenômenos de Transporte.

Aprovado em: 29 de Maio de 2012

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Mariano Paes de Carvalho Filho (Orientador)
Instituto de Matemática e Estatística da UERJ

Prof. Dr. Norberto Mangiavacchi
Faculdade de Engenharia da UERJ

Prof. Dr. Nelson Violante de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ - COPPE

Prof. Dr. José Antônio Baptista Neto
Instituto de Geociências da UFF

Prof. Dr. Luiz Gallisa Guimarães
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ - COPPE

Rio de Janeiro

2012

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às três mulheres da minha vida:

Minha mãe, Elizete, por sua dedicação incondicional e infinita ao longo de todas as etapas de minha vida. Ainda que não haja como retribuir proporcionalmente, fica registrada esta homenagem e meu compromisso de sempre buscar o máximo.

Minha irmã, Ana Paula, em reconhecimento ao seu papel primordial em nossa família. Enquanto o mundo nos enche de exemplos e conceitos decadentes você nos brindou com sua nobreza, garra e resignação dando a cada um de nós condições de desenvolvimento além de um grande exemplo de vida. Irmã, acho que nunca terei a chance de compensá-la adequadamente por tudo... Mas talvez esta seja a justiça por trás da “vida eterna”.

Minha companheira, Sandra, que a cada dia completa minhas definições de amor e futuro.

AGRADECIMENTO

Agradeço aos Professores Luiz Mariano e Nelson Violante pela grande oportunidade de me inserir em um grupo de pesquisa de tamanha qualidade, pela confiança depositada em mim bem como pela grandiosa tutoria que tenho recebido. É um grande privilégio trabalhar com vocês.

Agradeço a todos os profissionais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UERJ, sobretudo ao Professor Norberto Mangiavacchi, não só pela oportunidade que me foi dada mas também pela grande dedicação e eficiência frente às demandas de nosso curso.

Agradeço às colegas de curso de graduação Virgínia Silva da Costa e Carla Verônica Teixeira Sobrinho pelo apoio e incentivo decisivos na retomada de meu desenvolvimento acadêmico.

Agradeço aos colegas de curso, amigos e parentes que me apoiaram ao longo desta caminhada.

Agradeço à FAPERJ pela bolsa de Mestrado concedida.

RESUMO

SANTOS, Felipe M. *Acoplamento de Simulador de imagens SAR a Interpretador MPI para estimação do espectro direcional de ondas*. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2012.

O protótipo de uma interface gráfica para análise de imagens SAR (radar de abertura sintética - da sigla em inglês (*Synthetic Aperture Radar*) vem sendo desenvolvido e aperfeiçoado. Em seu estágio atual, a ferramenta é capaz de extrair o espectro direcional de ondas e o campo de ventos de imagens ERS 1&2. Dentre as diversas abordagens empregadas no desenvolvimento do protótipo, pode-se citar a avaliação da metodologia atualmente utilizada na interpretação das imagens. Neste sentido, é apresentada uma proposta de geração de imagens SAR sintéticas, de forma a viabilizar a avaliação do método de extração de parâmetros meteo-oceanográficos a partir do acoplamento do simulador de imagens com o interpretador utilizado no protótipo. Uma comparação detalhada entre os valores empregados para simulação e os resultados sacados da interface torna possível identificar possíveis deficiências e indicar aperfeiçoamentos ao método. Desta forma, o presente trabalho, além de discutir o protótipo para análise de imagens SAR, apresenta o desenvolvimento do acoplamento do simulador de imagens. Os resultados obtidos indicam que o acoplamento atingiu parcialmente seu objetivo apresentando bons resultados na interpretação das direções. Porém, ainda há algumas questões a serem avaliadas para a obtenção de resultados mais consistentes.

Palavras-chave: Mecânica dos Fluidos, Radar de Abertura Sintética (SAR), Espectro Direcional de Ondas, Sensoriamento Remoto do Oceano.

ABSTRACT

A prototype of a graphical interface for SAR (Synthetic Aperture Radar) images has been developed and improved. In its current stage, the tool is able to extract the directional wave spectrum and the wind field of ERS 1&2 images. Among the various approaches used in developing the prototype, the evaluation of the currently used methodology in the image interpretation should be highlighted. In this work, synthetic SAR images are generated aiming to evaluate techniques to extract the directional wave spectrum. The coupling between the output of the SAR simulator and the input of the algorithm to generate the wave spectrum is pursued. Furthermore, a detailed comparison between the values used for simulation and the results drawn from the interface allows the identification of deficiencies and potential improvements to the current method. Thus, the present work presents development of the coupling and presents some of the features of the SAR. The results presented indicate that the coupling partially achieved their goal with good results in the wave direction interpretation. However, there are still some issues that should be evaluated to obtain more consistent results.

Keywords: Fluid Mechanics, Synthetic Aperture Radar (SAR), Directional Wave Spectrum, Ocean Remote Sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Caracterização das ondas. Figura baseada em [1, p.04]	18
Figura 2 : Representação gráfica da função de onda.	19
Figura 3 : Elevação da superfície, onda, zero descendente e zero ascendente. Figura baseada em [1]	19
Figura 4 : Características básicas da onda harmônica. Figura baseada em [2]	20
Figura 5 : Representação do movimento orbital induzido pela propagação de uma onda harmônica da esquerda para a direita. Figura baseada em [1]	23
Figura 6 : Representação de uma onda no plano xy. Figura baseada em [3].	25
Figura 7 : Superposição de ondas senoidais. Figura baseada em [1].	26
Figura 8 : Composição de estado de mar. Figura baseada em [1].	26
Figura 9 : Elevação da superfície do mar e seus espectros de amplitude e fase. Figura baseada em [1].	28
Figura 10: Transformação do espectro de amplitude discreto em espectro contínuo de densidade de variância. Figura baseada em [1].	30
Figura 11: A interpretação do espectro de densidade de variância como a distribuição da variância total sobre a frequência. Figura baseada em [1].	31
Figura 12: Representação das elevações de superfície do mar a partir de seus espectros. Figura baseada em [1].	31
Figura 13: A contribuição Δvar da área de controle ($\Delta f \Delta \theta$) para a variância total das ondas - coordenadas polares. Figura baseada em [1].	33
Figura 14: Representação da distribuição direcional em um espectro bidimensional. Figura baseada em [1].	34
Figura 15: Espectro de número de onda bidimensional apresentado em coordenadas polares.	35
Figura 16: Diagrama simplificado da transmissão e recepção de sinais. Figura baseada em [4].	37
Figura 17: Diagrama de blocos de um sistema de RADAR. Figura baseada em [4]. ...	38
Figura 18: Modos de operação SAR mais comuns. Figura baseada em [4].	39
Figura 19: Diagrama simplificado da técnica InSAR. Figura baseada em [4].	40

Figura 20: Geometria de imageamento por radar. Figura baseada em [5].	40
Figura 21: Direções de propagação do campo elétrico: a - polarização vertical e b - polarização horizontal. Figura baseada em [5].	41
Figura 22: Propagação de sinal (ondas) entre pontos estacionários. Figura baseada em [4].	42
Figura 23: Detalhamento da ocorrência do efeito Doppler. Figura baseada em [4].	43
Figura 24: Detalhamento da resolução de distância e ambiguidade do RADAR. Figura baseada em [4].	43
Figura 25: Célula de resolução. Δx é a resolução em range e Δy é a resolução azimutal. Figura baseada em [6].	44
Figura 26: Distorções na imagem decorrentes da variação da inclinação e da su- perfície. Figura baseada em [4].	45
Figura 27: Direções de visada do sistema RADARSAT. Figura baseada em [5].	46
Figura 28: Modelo de padrões de espalhamento para uma superfície horizontal: a- superfície lisa; b- superfície intermediária e c- superfície rugosa. Figura baseada em [5].	47
Figura 29: Curvas típicas de retroespalhamento para superfícies lisas, moderada- mente rugosas e muito rugosas. Figura baseada em [5].	47
Figura 30: Modulação de inclinação ou <i>tilt</i> , modulação hidrodinâmica e modulação de <i>Velocity Bunching</i> . Figura baseada em [7].	51
Figura 31: Imagem SAR destacando ondas superficiais se propagando na direção de <i>range</i> . Imagem do satélite RADARSAT-1.	54
Figura 32: Imagem SAR destacando ondas internas. Imagem do satélite SEASAT...	55
Figura 33: Apresentação simplificada do macrofluxo do pacote WASAR-MPI.	64
Figura 34: Exemplo de uma imagem SAR e seu espectro da imagem associado.	65
Figura 35: Representação polar o espectro direcional de onda utilizado como <i>first guess</i> .	66
Figura 36: Interface gráfica do SSSWS detalhando as janelas de dados de entrada.	71
Figura 37: Representação do espectro observado em JONSWAP a partir de diversas dimensões de pista de ventos. Figura baseada em [1].	72
Figura 38: Exemplo de imagem sem ruído simulada através do SSSWS com ondas se propagando na direção de <i>range</i> .	72

Figura 39: Exemplo de imagem com ruído simulada através do SSSWS com ondas se propagando na direção de <i>range</i>	72
Figura 40: Formulário de entrada dos parâmetros do sensor - SSSWS.	74
Figura 41: Formulário de entrada dos parâmetros da imagem - SSSWS.	74
Figura 42: Ajustes no espalhamento direcional.	76
Figura 43: Ajustes no espalhamento direcional.	77
Figura 44: Formação do espectro direcional a partir dos vetores ajustados.	77
Figura 45: Simulação 01 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	79
Figura 46: Simulação 01 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	79
Figura 47: Simulação 02 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	80
Figura 48: Simulação 02 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	80
Figura 49: Simulação 03 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	81
Figura 50: Simulação 03 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	82
Figura 51: Simulação 04 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	83
Figura 52: Simulação 04 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	83
Figura 53: Simulação 05 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	84
Figura 54: Simulação 05 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	84
Figura 55: Simulação 06 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	85
Figura 56: Simulação 06 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	86
Figura 57: Simulação 07 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	87
Figura 58: Simulação 07 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	87
Figura 59: Simulação 08 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	88
Figura 60: Simulação 08 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	88
Figura 61: Simulação 09 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	90
Figura 62: Simulação 09 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	90
Figura 63: Simulação 10 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	91
Figura 64: Simulação 10 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	92
Figura 65: Simulação 11 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	93
Figura 66: Simulação 11 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	93
Figura 67: Simulação 12 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	94
Figura 68: Simulação 12 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	95
Figura 69: Simulação 13 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	96

Figura 70: Simulação 13 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	96
Figura 71: Simulação 14 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	97
Figura 72: Simulação 14 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	98
Figura 73: Simulação 15 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.	99
Figura 74: Simulação 15 - Espectro direcional <i>first guess</i> e processado pelo WASAR.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Parâmetros de entrada no SSSWS - Simulações 01 a 08.	78
Tabela 2 : Simulação 01 - Resultados numéricos.	78
Tabela 3 : Simulação 02 - Resultados numéricos.	80
Tabela 4 : Simulação 03 - Resultados numéricos.	81
Tabela 5 : Simulação 04 - Resultados numéricos.	82
Tabela 6 : Simulação 05 - Resultados numéricos.	84
Tabela 7 : Simulação 06 - Resultados numéricos.	85
Tabela 8 : Simulação 07 - Resultados numéricos.	86
Tabela 9 : Simulação 08 - Resultados numéricos.	88
Tabela 10: Simulação 09 - Resultados numéricos.	89
Tabela 11: Simulação 10 - Resultados numéricos.	91
Tabela 12: Simulação 11 - Resultados numéricos.	92
Tabela 13: Simulação 12 - Resultados numéricos.	94
Tabela 14: Simulação 13 - Resultados numéricos.	96
Tabela 15: Simulação 14 - Resultados numéricos.	97
Tabela 16: Simulação 15 - Resultados numéricos.	98

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	15
1	TÓPICOS DE OCEANOGRAFIA FÍSICA.....	17
1.1	Introdução à teoria de ondas	17
1.2	Teoria linear de ondas.....	18
1.3	Composição de ondas lineares.....	25
1.4	Espectro de onda	27
2	IMAGEAMENTO DA SUPERFÍCIE DO OCEANO ATRAVÉS DO SAR.....	36
2.1	Princípios da operação de um RADAR.....	37
2.2	RADAR de Abertura Sintética	38
2.3	Parâmetros básicos do sistema	41
2.3.1	Polarização	41
2.3.2	Efeito Doppler	42
2.3.3	Resolução e Ambiguidade do RADAR	43
2.3.4	Ângulo de incidência	44
2.3.5	Direção de visada	46
2.3.6	Rugosidade da superfície imageada	46
2.3.7	A constante dielétrica e a profundidade de penetração	47
2.4	A superfície do oceano e o espalhamento do sinal de radar	48
2.4.1	Interações entre ondas curtas e ondas longas.....	49
2.4.2	Interação de ondas curtas e correntes	51
2.4.3	Manchas de óleo na superfície do oceano.....	52
2.5	Características das feições da imagem SAR sobre o oceano.....	53
2.5.1	Ondas superficiais.....	53
2.5.2	Ondas Internas	54
2.5.3	Correntes, frentes e vórtices	55
2.5.4	Batimetria	55
2.6	Interações ar-mar	56

2.6.1	Ventos superficiais	56
2.6.2	Vórtices atmosféricos.....	56
2.6.3	Ondas de gravidade.....	56
2.6.4	Células de chuva.....	57
3	PACOTE NEWSAR - MPI.....	58
3.1	Método direto.....	59
3.1.1	Superfície estática.....	60
3.1.2	Efeitos do movimento	61
3.2	Método inverso	62
3.3	A implementação do WASAR	63
4	SIMULADOR DE IMAGENS SAR - SSSWS.....	67
4.1	Teoria elementar	67
4.2	Funcionamento do SSSWS	70
5	ACOPLAMENTO DO SIMULADOR SSSWS AO ALGORITMO WASAR-MPI	73
5.1	Adaptação das características da saída do SSSWS.....	73
5.2	Extração do espectro direcional de ondas do SSSWS.....	75
5.2.1	Ajustes no espalhamento direcional.....	75
5.2.2	Ajustes no espectro unidimensional.....	76
5.3	Verificação do acoplamento do SSSWS em sua formulação original	77
5.3.1	Simulação 01	78
5.3.2	Simulação 02	79
5.3.3	Simulação 03	81
5.3.4	Simulação 04	82
5.3.5	Simulação 05	83
5.3.6	Simulação 06	85
5.3.7	Simulação 07	86
5.3.8	Simulação 08	87
5.4	Verificação do acoplamento do SSSWS com alteração do espectro direcional de onda	89
5.4.1	Simulação 09	89

5.4.2	Simulação 10	90
5.4.3	Simulação 11	92
5.4.4	Simulação 12	93
5.5	Verificação do acoplamento do SSSWS com alteração do campo de elevação da superfície do oceano.....	95
5.5.1	Simulação 13	95
5.5.2	Simulação 14	97
5.5.3	Simulação 15	98
	CONCLUSÃO	100
	REFERÊNCIAS.....	104

INTRODUÇÃO

Esta dissertação foi baseada nos estudos realizados por um grupo de pesquisa que têm como objetivo desenvolver uma ferramenta para análise de imagens SAR (Radar de abertura sintética, da sigla em inglês) sobre o oceano. O principal objetivo desta ferramenta é extrair informações meteo-oceanográficas confiáveis de forma a consolidar um novo meio de aquisição de dados com custos operacionais bastante reduzidos em relação aos meios utilizados atualmente. Este trabalho trata especificamente da obtenção do espectro direcional de ondas a partir de uma imagem SAR, propondo o acoplamento de um simulador de imagens a um algoritmo interpretador.

O SAR é um radar que opera na faixa das microondas que se utiliza de uma única antena para transmissão e recepção de sinal. Devido à sua característica única de fornecer informações da cena iluminada em alta resolução, torna-se uma ferramenta de grande interesse para aplicações oceanográficas. Entretanto, o imageamento de uma cena dinâmica, como o oceano, é consideravelmente mais complexo em comparação a uma cena estática. Em particular, as relações entre as ondas de gravidade superficiais e o sinal recebido pelo radar são questões extremamente delicadas e não-triviais. [8]

Assim, existem diversas formulações para o tratamento dessas questões de forma a se obter as informações desejadas. Uma dessas formulações consiste no algoritmo interpretador WASAR-MPI, que apresentou resultados consistentes na obtenção do espectro direcional de ondas em diversos experimentos [9].

Uma avaliação mais criteriosa desta interpretação seria possível em casos onde, além da cobertura do radar, houvesse a disponibilidade de dados complementares de forma a permitir uma comparação direta (como por exemplo ter uma imagem SAR de uma localidade onde havia instalada uma bóia oceanográfica). Porém, ainda que houvesse tal disponibilidade, só seria possível avaliar a resposta da interpretação para aquele cenário em específico.

Para eliminar esta limitação, será utilizado um simulador de imagens SAR que poderá gerar imagens que representem diversas condições oceanográficas, assim, permitindo uma avaliação bem ampla do WASAR-MPI.

Ao longo deste trabalho, todas as características e particularidades envolvendo este acoplamento serão apresentadas bem como os resultados obtidos a partir desta primeira

abordagem ao assunto.

Abaixo, são apresentadas as descrições de cada capítulo desta dissertação.

- No capítulo 1, será apresentada brevemente uma introdução aos conceitos fundamentais de oceanografia física relacionados a este trabalho;
- No capítulo 2, será apresentado um detalhamento teórico sobre radares e o imageamento do oceano através do SAR;
- No capítulo 3, será apresentado o algoritmo interpretador WASAR-MPI;
- No capítulo 4, será apresentado o simulador de imagens SAR SSSWS;
- No capítulo 5, será apresentado o acoplamento do simulador ao interpretador;
- No capítulo 6, serão apresentadas diversas simulações de cenários já considerando o acoplamento;
- No capítulo 7, serão apresentados os resultados e considerações finais.

1 TÓPICOS DE OCEANOGRAFIA FÍSICA

1.1 Introdução à teoria de ondas

Ondas superficiais no oceano são geradas, em geral, a partir de forçantes naturais tais como pressão, atrito com a atmosfera (especialmente a partir dos ventos), terremotos, gravidade da Terra e corpos celestiais (Sol e Lua), força de Coriolis (devido à rotação da Terra) e tensão superficial.

As características das ondas estão associadas às suas forçantes predominantes. Ondas de maré são geradas a partir da gravidade da Lua e do Sol e podem ser caracterizadas como ondas de grande comprimento. Ondas capilares são ondas de pequeno comprimento influenciadas pela tensão superficial da água. Nos casos onde a gravidade é a principal força restauradora do nível médio da água a uma posição de equilíbrio, as ondas são ditas de gravidade.

Ondas podem ser caracterizadas basicamente pelo seu período. O tipo de força geradora e a quantidade de energia de diversos tipos de ondas encontradas na natureza são apresentados na figura Figura 1.

Ondas de gravidade superficiais são geradas pelo vento e estão quase sempre presentes no oceano. Elas podem ser geradas localmente pelo vento, ou podem deixar a área de geração e se propagarem por milhares de km. Elas afetam um considerável número de atividades, tais como pesca, transporte, lazer, indústria costeira e oceânica, gerenciamento costeiro (defesa) e controle de poluição. Elas também são muito importantes nos processos climáticos, considerando sua significativa contribuição na transferência de calor, energia, gases e partículas entre oceano e atmosfera. Desta forma, estas ondas são o tema deste capítulo.

O texto acima foi baseado em [10, p.01].

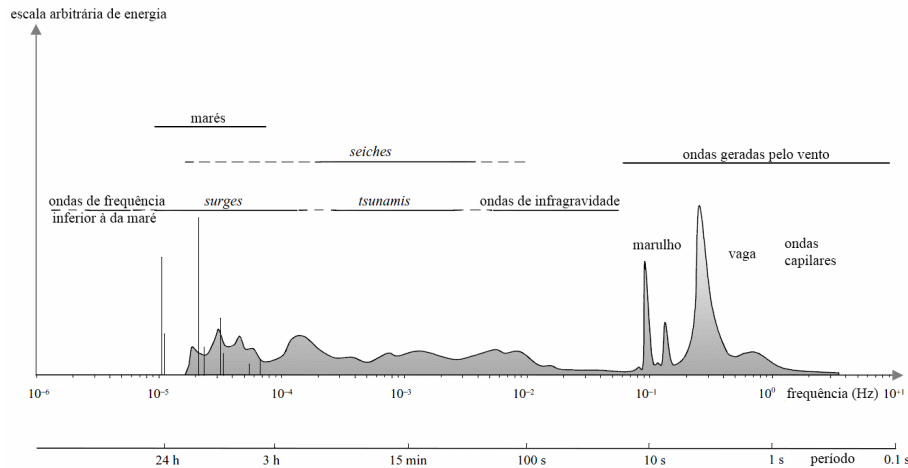


Figura 1 : Caracterização das ondas. Figura baseada em [1, p.04]

1.2 Teoria linear de ondas

Para desenvolver a teoria linear para ondas de gravidade é necessário assumir que a água é um fluido ideal (incompressível, densidade constante e sem viscosidade) e que suas partículas estejam sujeitas apenas às forças oriundas da gravitação da Terra. Deve-se considerar ainda que as partículas de água não deixam a superfície ou penetram no solo e a amplitude das ondas deve ser pequena em relação ao comprimento de onda e profundidade. [1, p.107-109]

Definição 1.2.1 (Onda - Definição geral) *Onda é a propagação de algum tipo de perturbação através de um meio.* [11, p.01]

Definição 1.2.2 (Onda harmônica) *Onda harmônica é uma onda cuja forma é senoidal (contínua, periódica e limitada).* [2, p.07]

Definição 1.2.3 (Função de onda) *Esta função descreve a perturbação decorrente da onda em relação ao espaço e tempo. Supondo que seja uma ondulação no mar, a perturbação representa a variação da posição vertical. Por exemplo: $\eta(x, t) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ tal que $\eta(x, t) = \sin(kx - \omega t)$. A figura Figura 2 exibe uma possível representação da função de onda.* [2, p.05]

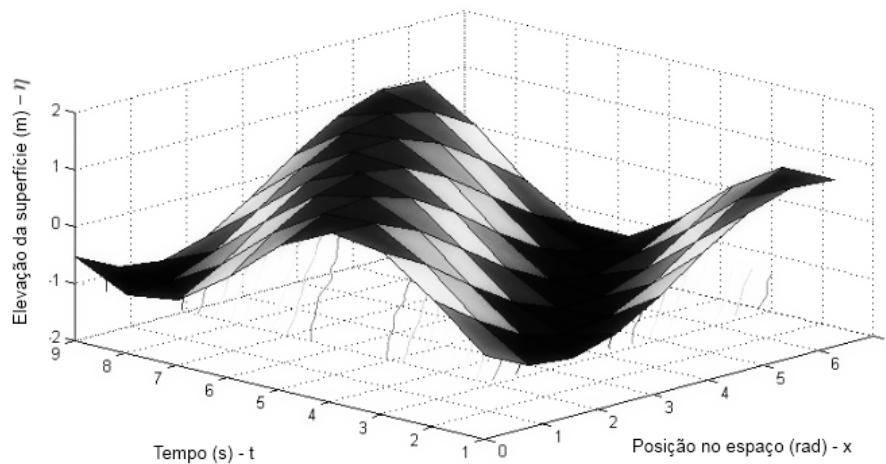


Figura 2 : Representação gráfica da função de onda.

Definição 1.2.4 (Zero descendente) *Um zero descendente é o ponto onde a função de onda apresenta valor nulo e derivada primeira negativa. (Deve-se considerar a função de onda derivável.) [1, p.025-026]*

Definição 1.2.5 (Zero-ascendente) *Um zero ascendente é o ponto onde a função de onda apresenta valor nulo e derivada primeira positiva. (Deve-se considerar a função de onda derivável.) [1, p.025-026]*

Definição 1.2.6 (Onda - Definição específica) *Uma onda (na superfície do oceano) é definida como os valores de elevação da superfície correspondentes ao intervalo entre dois zero-descendentes (ou dois zero-ascendentes). A figura Figura 3 destaca bem esta definição. [1, p.025-026]*

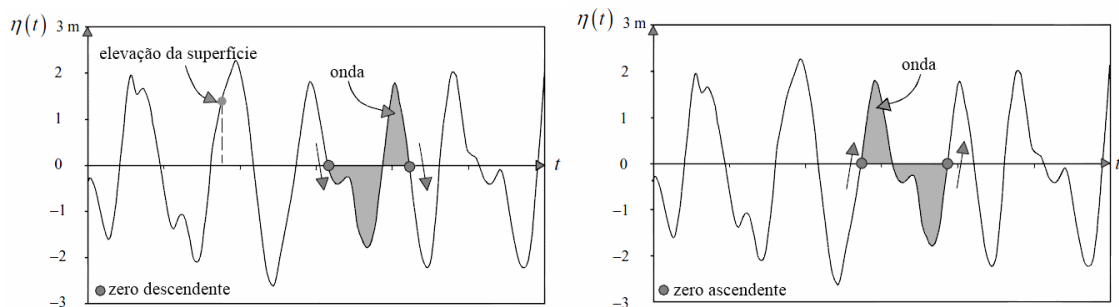


Figura 3 : Elevação da superfície, onda, zero descendente e zero ascendente. Figura baseada em [1]

Neste momento, é importante destacar algumas características das ondas harmônicas.

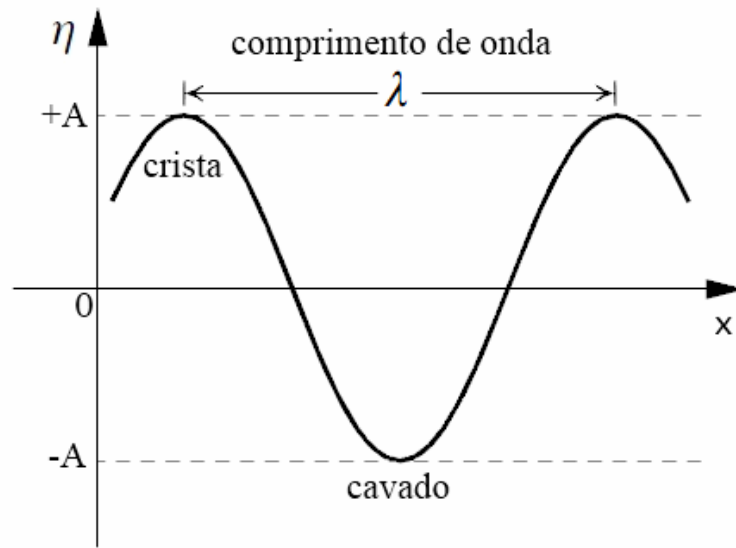


Figura 4 : Características básicas da onda harmônica. Figura baseada em [2]

Definição 1.2.7 (Crista) A crista da onda é o ponto onde a função de onda (harmônica) apresenta seu valor máximo. (Uma função de onda harmônica é limitada, contínua e periódica logo admite valor máximo.) [2, p.04]

Definição 1.2.8 (Cavado) O cavado da onda é o ponto onde a função de onda (harmônica) apresenta seu valor mínimo. (Uma função de onda harmônica é limitada, contínua e periódica logo admite valor mínimo.) [2, p.04]

Definição 1.2.9 (Fase de onda) A fase da onda, representada por ϕ , é definida como o argumento da função seno de uma função de onda harmônica. Em geral apresentada em radianos. [3, p.216]

Definição 1.2.10 (Comprimento de onda) O comprimento de onda, representado por λ , é definido como a distância entre duas cristas sucessivas. Em geral, é apresentado em metros(m). [10, p.02]

Definição 1.2.11 (Período de onda) O período de onda, representado por T , é definido como o tempo decorrido entre a passagem de duas cristas sucessivas sobre o mesmo ponto fixo. Em geral, é apresentado em segundos(s). [10, p.02]

Definição 1.2.12 (Frequência de onda) *A frequência de onda, representada por f , é definida como o número de cristas que passam por um ponto fixo durante o intervalo de tempo de um segundo. Em geral, é apresentada em Hertz(Hz). [10, p.02]*

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.1)$$

Definição 1.2.13 (Amplitude de onda) *A amplitude de onda, representada por A , é definida como o valor máximo da função de onda. Em geral, é apresentada em metros(m). [2, p.08]*

Definição 1.2.14 (Altura de onda) *A altura de onda, representada por H , é definida como a diferença na elevação da superfície entre a crista e o cavado da onda. Em geral, é apresentada em metros(m). [10, p.02]*

$$H = 2A \quad (1.2)$$

Definição 1.2.15 (Energia da onda) *A presença de ondulações no oceano implica não somente na movimentação de partículas de água(energia cinética) bem como no deslocamento de suas posições de equilíbrio(energia potencial). Desta forma, deve-se considerar a energia induzida pelas ondas no oceano(cinética e potencial). A definição abaixo descreve a energia total de uma onda harmônica de amplitude a em um período de onda por unidade de área (em relação ao eixo horizontal):*

$$E_{onda} = \frac{1}{2}\rho_w g a^2 \quad (1.3)$$

Onde ρ_w é a densidade da água e g é a aceleração da gravidade.

[1, p.132]

Definição 1.2.16 (Velocidade de propagação) *A velocidade de propagação, representada por c , é a velocidade que um ponto de fase qualquer, como por exemplo a crista ou o cavado, se propaga. Também chamado de velocidade da onda ou velocidade da fase. Em geral, apresentada em metros por segundo. [10, p.02]*

Definição 1.2.17 (Número de onda) *O número de onda, representado por k , é definido como a quantidade de ondas presentes em uma distância de 2π unidades de medida (em geral, em metros). [12, p.010]*

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.4)$$

Definição 1.2.18 (Frequência angular) *A frequência angular, representada por ω , é definida como a taxa de variação da fase da onda por unidade de tempo. Em geral, apresentada em radiano por segundo. [3, p.217]*

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1.5)$$

$$\omega = ck \quad (1.6)$$

Definição 1.2.19 (Relação de dispersão) *A variação da velocidade de propagação da onda em relação ao comprimento de onda é chamada de dispersão e, sua relação funcional é chamada de relação de dispersão. Para águas profundas, pode ser representada pela equação abaixo. [10, p.02]*

$$\omega^2 = gk \quad (1.7)$$

Onde g é a aceleração da gravidade.

Definição 1.2.20 (Movimento orbital) *Movimento orbital é o movimento das partículas de água induzido pela passagem da onda. A teoria linear, na ausência de correntes, prevê que este movimento se dê na forma de uma elipse fechada, ou seja, não ocorre movimento resultante da água na direção de propagação da onda. Segundo esta teoria, não ocorre transporte de massa, somente de energia. Em profundidades superiores a metade do comprimento da onda, esta elipse se reduz a um círculo [10, p.03] [1, p.122]. A figura Figura 5 exibe um caso específico de movimento orbital.*

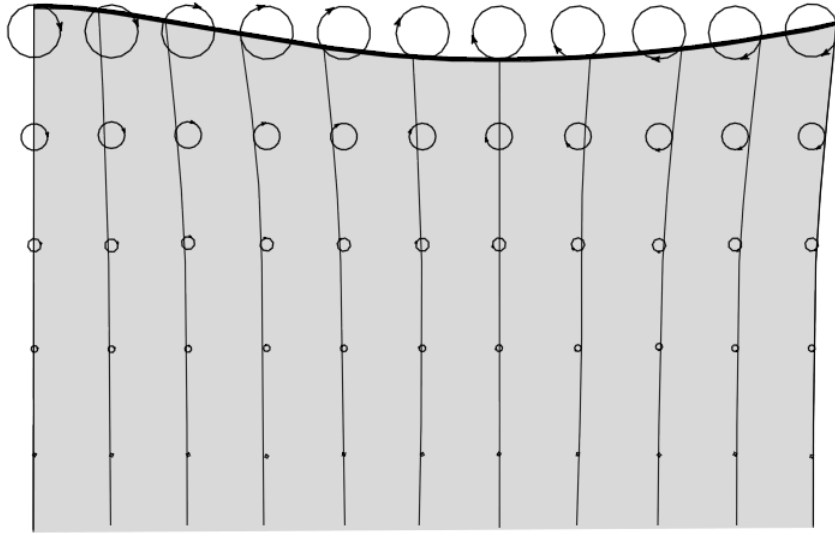


Figura 5 : Representação do movimento orbital induzido pela propagação de uma onda harmônica da esquerda para a direita. Figura baseada em [1]

Equação da onda unidimensional(no espaço) [12, p.03]:

$$\frac{\partial^2 \eta(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \eta(x, t)}{\partial t^2} \quad (1.8)$$

Onde:

- $\eta(x, t) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ - Posição vertical em função da posição horizontal x e do tempo decorrido t .
- c é a velocidade de propagação da onda.

A equação 1.8 é o integrante mais simples da família de equações de onda. De qualquer maneira, conhecer um pouco sobre suas soluções é bastante útil no estudo de equações mais complexas.

Uma das soluções analíticas da equação 1.8 é apresentada a seguir [1, p.118] [2, p.04]:

$$\eta(x, t) = A \sin(\omega t - kx + \phi_0) \quad (1.9)$$

Onde:

- ϕ_0 é uma constante, chamada de constante de fase, que representa o valor da fase quando $x = t = 0$.

Até o presente momento, apenas a formulação unidimensional foi considerada. Porém, é interessante exibir a formulação bidimensional da equação 1.9 bem como elaborar mais alguns conceitos importantes.

Definição 1.2.21 (Vetor número de onda - bidimensional) *O vetor número de onda(2D), representado por $\vec{K}$, apresenta como suas componentes o número de onda nos eixos x e y (k_x e k_y , respectivamente). Sua direção indica a direção de propagação das ondas ($\arctan \frac{k_y}{k_x}$). Sua magnitude é dada pela expressão $|\vec{K}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ [3, p.217] [1, p.049-050]*

Definição 1.2.22 (Vetor posição - bidimensional) *O vetor posição(2D), representado por $\vec{r}$, apresenta como suas componentes as posições relativas aos eixos x e y respectivamente. [13, p.02]*

Definição 1.2.23 (Vetor velocidade de propagação - bidimensional) *É o vetor que apresenta como suas componentes as velocidades de propagação das ondas nos eixos x e y (c_x e c_y , respectivamente). É representado por $\vec{c}$. [3, p.217]*

De acordo com [3, p.217], a equação 1.9 pode ser generalizada para duas dimensões (no espaço):

$$\eta(x, y, t) = \eta(\vec{r}, t) = A \sin(\omega t - \vec{K} \cdot \vec{r}) \quad (1.10)$$

Abaixo, seguem algumas relações básicas que envolvem os conceitos bidimensionais, apresentados acima [3, p.217-218]:

$$\lambda = \frac{2\pi}{|\vec{K}|} \quad (1.11)$$

$$\vec{c} = \frac{\omega}{|\vec{K}|} \frac{\vec{K}}{|\vec{K}|} \quad (1.12)$$

$$c_x = \frac{\omega}{k_x} \quad (1.13)$$

$$c_y = \frac{\omega}{k_y} \quad (1.14)$$

Onde $\frac{\vec{K}}{|\vec{K}|}$ representa o vetor unitário da direção de $\vec{K}$.

A figura Figura 6 destaca a representação de uma no plano xy.

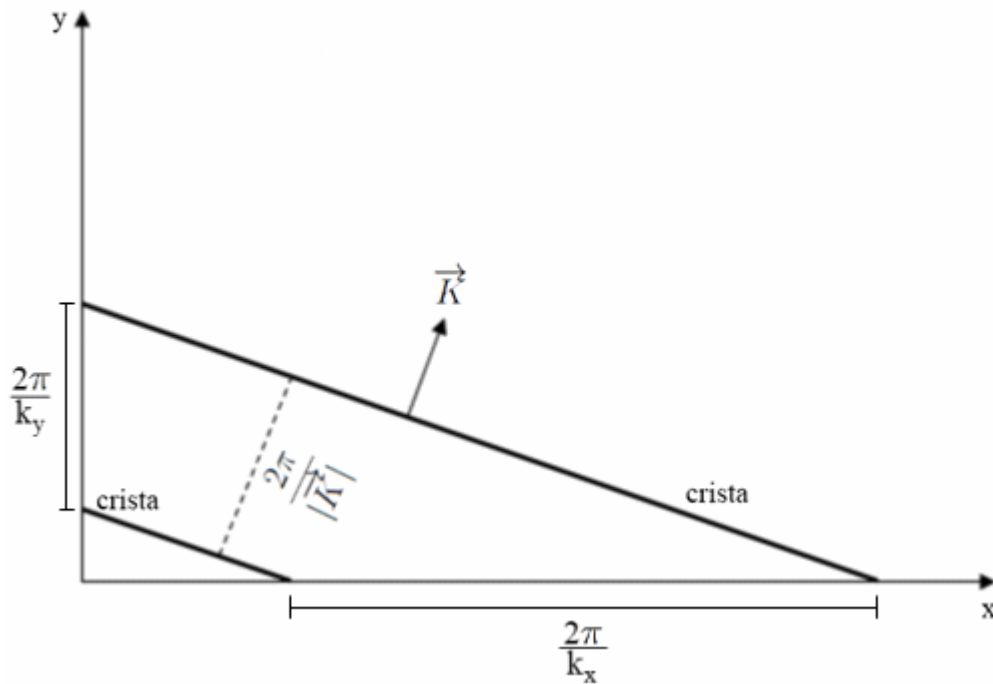


Figura 6 : Representação de uma onda no plano xy. Figura baseada em [3].

1.3 Composição de ondas lineares

Além das conveniências matemáticas decorrentes da utilização da função seno (ou cosseno) na teoria de ondas, deve-se destacar que pode ser demonstrado que funções periódicas arbitrárias (e, de fato, funções não-periódicas também) podem ser representadas, com a precisão desejada, como a superposição linear de uma série de funções seno (ou cosseno). Esta disciplina da matemática é conhecida como Análise de Fourier. [12, p.08] [14, p.02]

Ondas no oceano não parecem tão simples quanto a onda representada na figura Figura 4. Com sua aparência irregular, elas parecem confusas e constantemente alterando a superfície do mar. [10, p.06]

Utilizando a Análise de Fourier, estas ondas podem ser representadas como uma superposição de infinitas ondas senoidais, que se propagam de forma independente umas das outras. A figura Figura 8 destaca esta formulação. [12, p.08]

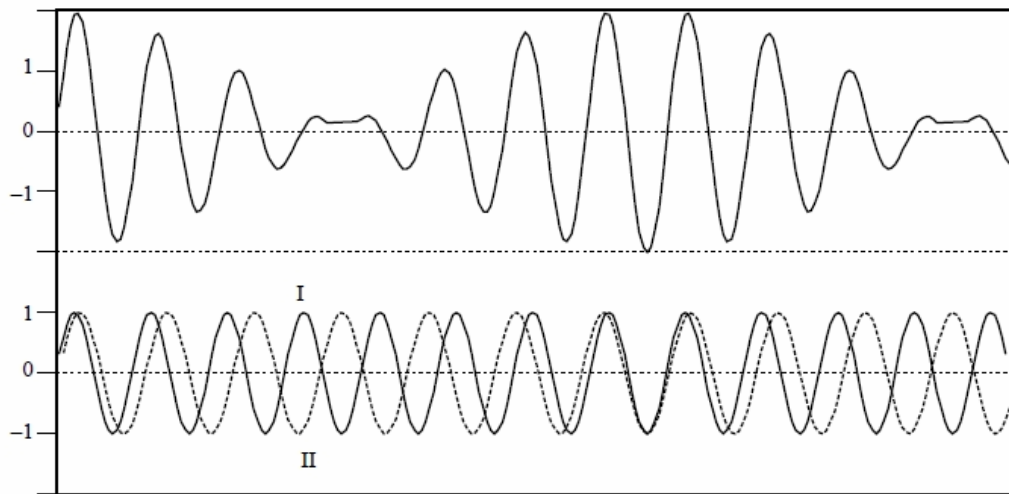


Figura 7 : Superposição de ondas senoidais. Figura baseada em [1].

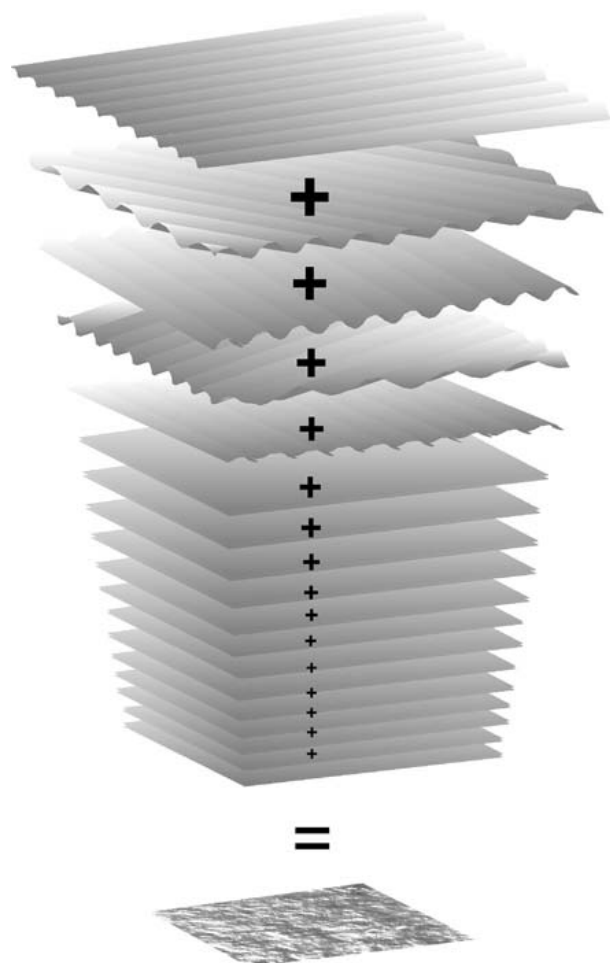


Figura 8 : Composição de estado de mar. Figura baseada em [1].

1.4 Espectro de onda

Este texto não visa apresentar detalhadamente todos os conceitos estatísticos necessários para uma abordagem ao tema, mas sim uma breve interpretação dos pontos principais. O que acaba sendo suficiente para o entendimento inicial do assunto. Para uma abordagem mais completa, recomenda-se a consulta de [15].

A observação da elevação da superfície do oceano em uma localidade e em um momento específico será considerada um experimento. A este experimento, serão associados valores reais que representam a elevação da superfície em relação a um referencial (em geral o nível médio do mar). Deve-se ressaltar que, mesmo que este experimento seja repetido diversas vezes sob as mesmas condições (vento, pressão, temperatura, etc.), os valores associados poderão variar. Tal variação se dá por conta dos intervalos de valores associados possíveis e suas respectivas probabilidades de ocorrência.

Sendo assim, é possível considerar a elevação da superfície do oceano em um ponto específico no espaço e em um instante específico de tempo como uma variável aleatória.

É importante destacar que, neste primeiro momento, deve-se considerar a posição espacial fixa em todos os casos. Assim, a elevação da superfície será representada por $\underline{\eta(t_i)}$, onde o sublinhado indica que se trata de uma variável aleatória e o termo t_i indica o instante específico de tempo.

Considerando o tempo contínuo, pode-se concluir que o experimento citado determinará a existência de infinitas variáveis aleatórias: $\underline{\eta(t_1)}, \underline{\eta(t_2)}, \underline{\eta(t_3)}, etc.$

Ao ordenar essas variáveis aleatórias em relação ao tempo e considerando um número grande de experimentos executados, será possível obter uma aproximação do cenário real da superfície do oceano. Desta forma, determina-se o processo estocástico $\boldsymbol{\eta(t)}$, em negrito para indicar que é um processo estocástico, que será o principal item de estudo nesta seção.

O objetivo de descrever as ondas do oceano com um espectro não é exatamente descrever com detalhes a superfície do oceano mas sim descreve-la como um processo estocástico. Ou seja, caracterizando todas as possíveis observações que poderiam ter sido efetuadas sob as condições atuais de observação. Uma observação então é tratada como a realização de um processo estocástico.

O conceito básico de espectro de onda é simples, mas suas características o fazem parecer complicado.

Inicialmente, deve-se considerar cada possível realização do processo estocástico $\boldsymbol{\eta}(t)$ como uma função $\eta_m(t)$ com duração D , onde m indica o número do experimento/realização.

Pode-se reproduzir esta função como a soma de um grande número de ondas harmônicas:

$$\eta_m(t) = \sum_{i=1}^N a_{i,m} \cos(2\pi f_{i,m} t + \phi_{i,m}(t)) \quad (1.15)$$

Onde:

- $a_{i,m}$ é a amplitude da i -ésima onda harmônica do m -ésimo experimento;
- $\phi_{i,m}$ é a constante de fase da i -ésima onda harmônica do m -ésimo experimento;
- $f_{i,m} = i_m/D$, $i_m = 1, 2, 3, 4, \dots$ é a frequência da i -ésima onda harmônica;
- $\Delta f = 1/D$ é o intervalo entre as frequências.

Com a Análise de Fourier, os valores de amplitude e fase podem ser determinados para cada frequência e, assim, podem ser obtidos os espectros de amplitude e fase, conforme mostra a figura Figura 9.

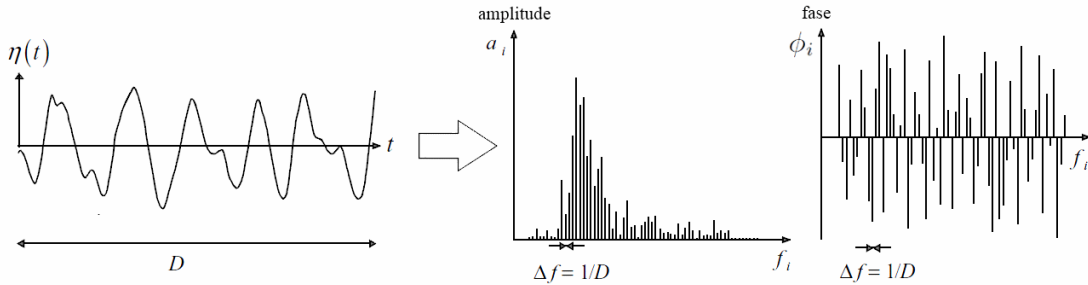


Figura 9 : Elevação da superfície do mar e seus espectros de amplitude e fase. Figura baseada em [1].

Na maior parte dos registros de ondas, as constantes de fase apresentam valores entre 0 e 2π sem nenhuma tendência de assumir um determinado valor (distribuição uniforme). Como este é quase sempre o caso em águas profundas, o espectro de fase será ignorado. Desta forma, apenas o espectro de amplitude será utilizado para caracterizar um registro de onda.

Considerando as possíveis variações entre cada realização de $\boldsymbol{\eta}(t)$, deve-se considerar um grande número (M) de repetições do experimento e calcular a média das amplitudes para todas as frequências de forma a determinar o espectro de amplitude média:

$$\bar{a}_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M a_{i,m} \quad (1.16)$$

Onde a barra superior indica o cálculo da média.

Para valores elevados de M, o valor de $\bar{a}_i$ converge, resolvendo o problema descrito acima.

No entanto, é mais interessante avaliar a variância de cada onda harmônica. Isto se deve à dois fatores:

- A variância é uma quantidade estatisticamente mais relevante que a amplitude;
- A energia das ondas é proporcional à variância.

Considerando que a variância de uma onda harmônica arbitrária, representada por $h(t) = a \cos(\phi(t))$, pode ser expressa por:

$$Var[h(t)] = \frac{1}{2}a^2 \quad (1.17)$$

E ainda que cada realização de $\boldsymbol{\eta}(t)$ pode ser representada como uma soma de um grande número de ondas harmônicas e que 'a variância da soma é a soma das variâncias', pode-se representar o espectro da variância de $\boldsymbol{\eta}(t)$ como:

$$Var[\boldsymbol{\eta}(t)] = \sum_{i=1}^N E[\frac{1}{2}a_i^2] \quad (1.18)$$

Onde $E[]$ representa o valor esperado, N representa o número total de ondas harmônicas consideradas e a_i (cada uma das amplitudes) é tratada como variável aleatória.

O espectro da variância é discreto (apresentando valores apenas para as frequências f_i , mas o fato é que todas as frequências estão presentes no oceano. Um primeiro passo para tratar esta questão é distribuir a variância ao longo do intervalo de frequência Δf . Desta forma, caracterizando a densidade de variância $Var[\boldsymbol{\eta}(t)]/\Delta f$ para cada frequência.

Agora, a variância está distribuída em todos os valores de frequência mas apresenta descontinuidades (saltos) entre seus valores. Esta questão pode ser resolvida aproximando o intervalo de frequências Δf de zero ($\Delta f \rightarrow 0$). Surge, então, a definição de espectro de densidade de variância:

$$S(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} Var[\boldsymbol{\eta}(t)] \quad (1.19)$$

A figura Figura 10 destaca bem a evolução das definições apresentadas acima.

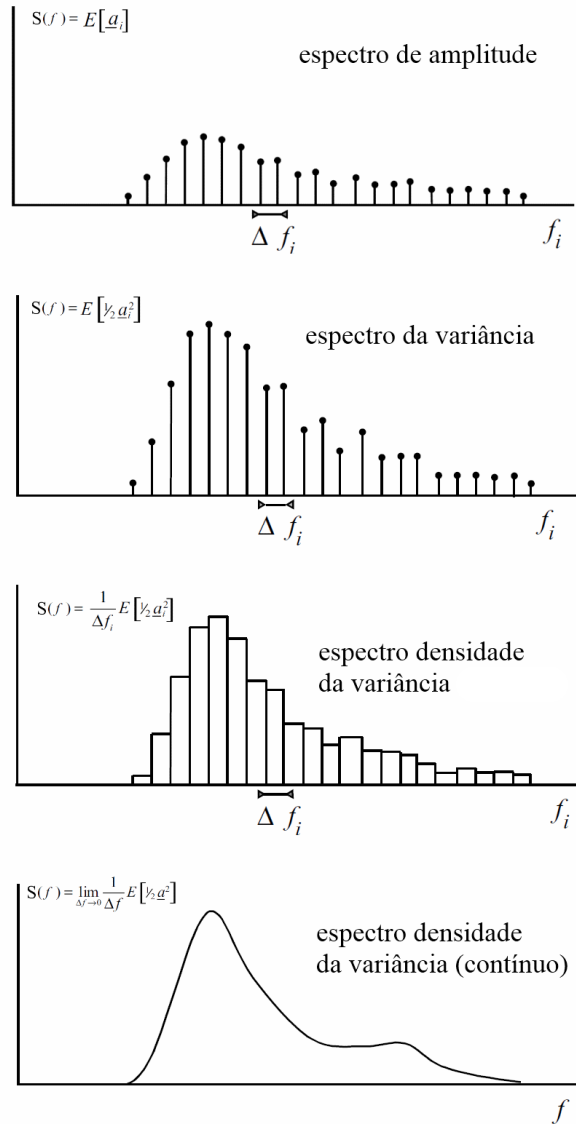


Figura 10 : Transformação do espectro de amplitude discreto em espectro contínuo de densidade de variância. Figura baseada em [1].

O espectro de densidade de variância, $S(f)$, apresenta como dimensão (comprimento² / frequência). Em geral, representado em $[m^2/Hz]$.

Este espectro indica a contribuição de um intervalo de frequência Δf contribui para a variância total (figura Figura 11):

$$\Delta Var = \int_{\Delta f} S(f) df \quad (1.20)$$

$$Var_{total} = \int_0^{\infty} S(f) df \quad (1.21)$$

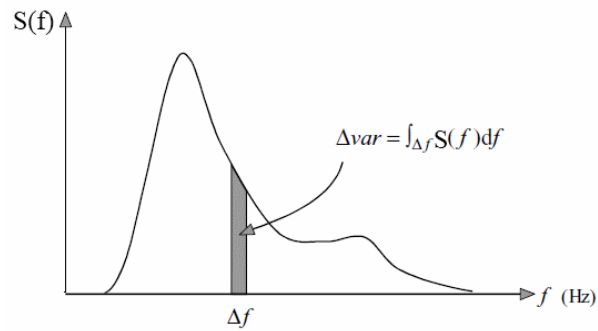


Figura 11 : A interpretação do espectro de densidade de variância como a distribuição da variância total sobre a frequência. Figura baseada em [1].

Talvez não seja simples interpretar/analisar o espectro de densidade de variância, mas, como a variância está diretamente relacionada com a energia, multiplicando o espectro por ρg , obtém-se o espectro de densidade de energia. Neste caso, a interpretação parece mais intuitiva.

A aparência geral das ondas podem ser relacionadas à forma de seu espectro (figura Figura 12): quanto mais estreito o espectro, mais regulares são as ondas.

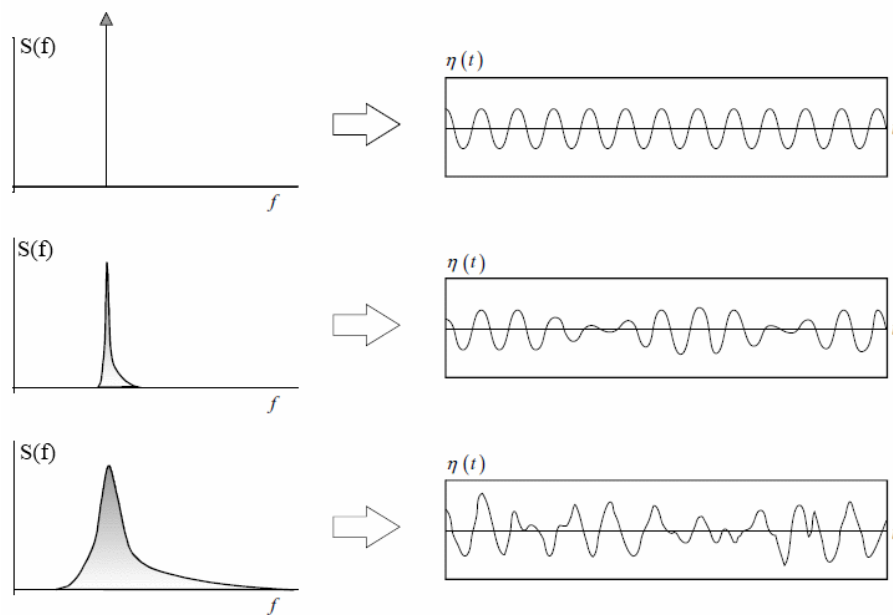


Figura 12 : Representação das elevações de superfície do mar a partir de seus espectros. Figura baseada em [1].

Cabe destacar que em todo o desenvolvimento acima as ondas harmônicas foram consideradas estatisticamente independentes. Ou seja, elas não alteram umas as outras. Esta aproximação é válida sobretudo para ondas geradas pelo vento. [1, p.049-061]

Existem diversas formulações para modelar o espectro unidimensional de ondas:

Phillips, Pierson-Moskowitz, JONSWAP, etc. Cada um com suas características e particularidades.

Até o presente momento, apenas o caso unidimensional foi apresentado. Porém, é importante destacar a teoria espectral para ondas em duas dimensões por se tratar de uma aproximação de ondas reais. De qualquer forma, a teoria bidimensional é baseada nos casos apresentados até então.

Agora, além da frequência deve-se considerar a direção de propagação das ondas em relação ao eixo positivo de x (considerando sua propagação no plano xy), representada por θ .

$$\boldsymbol{\eta}(\mathbf{t}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \underline{a_{i,j}} \cos(2\pi f_i - k_{x,i} \cos(\theta_j) - k_{y,i} \sin(\theta_j) + \underline{\phi_{i,j}}) \quad (1.22)$$

Onde os índices i e N correspondem à frequência (ou número de onda) e os índices j e M correspondem à direção de propagação das ondas harmônicas.

Usando as mesmas técnicas no caso unidimensional, o espectro de amplitude bidimensional pode ser transformado em um espectro de densidade de variância contínuo para todo i e j .

$$S(f, \theta) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{\Delta \theta \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f \Delta \theta} \text{Var}[\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{t})] \quad (1.23)$$

A dimensão de $S(f, \theta)$ é (comprimento^2 / frequência / ângulo), em geral representado por $[m^2/Hz/radiano]$ ou $[m^2/Hz/graus]$.

Este espectro indica como a variância de $\boldsymbol{\eta}(\mathbf{t})$ é distribuído sobre frequência e direção. O volume de $S(f, \theta)$ é igual à variância total da elevação da superfície do oceano.

$$\text{Var}_{total} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta df \quad (1.24)$$

A contribuição da área de controle ($\Delta f \Delta \theta$) para a variância total é dada por (figura Figura 13):

$$\Delta \text{Var} = \int_{\Delta f} \int_{\Delta \theta} S(f, \theta) d\theta df \quad (1.25)$$

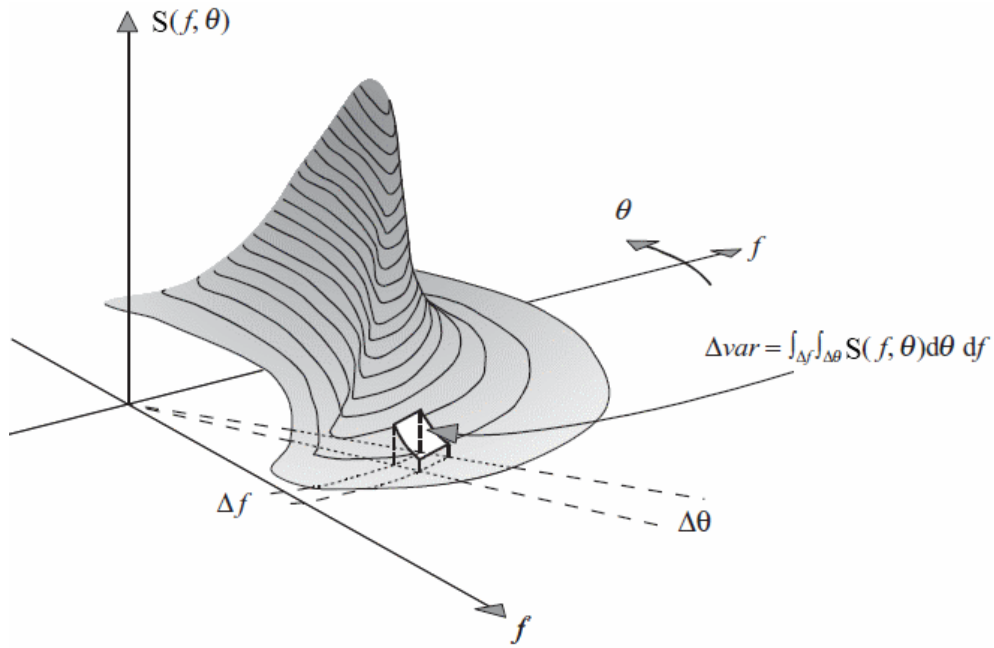


Figura 13 : A contribuição Δvar da área de controle $(\Delta f \Delta \theta)$ para a variância total das ondas - coordenadas polares. Figura baseada em [1].

O espectro unidimensional, $S(f)$, pode ser obtido do espectro bidimensional:

$$S(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta \quad (1.26)$$

A partir da formulação bidimensional do espectro é possível obter informações sobre a variação da direção das ondas. Neste caso, é importante introduzir o conceito de distribuição ou espalhamento direcional, representado por $D(\theta, f)$. Trata-se essencialmente do perfil do espectro bidimensional normalizado em relação ao espectro unidimensional (de forma que sua integral em relação às direções seja unitária) ao longo da curva de uma determinada frequência. Em outras palavras, é um perfil circular normalizado do espectro bidimensional (figura Figura 14).

Formalmente, o espalhamento direcional é adimensional. Porém, pode-se representá-lo com a unidade $[1/\text{ângulo}]$, ou seja, $[1/\text{rad}]$ ou $[1/\text{grau}]$. Além disso, embora seus valores variem em relação à frequência, é comum este termo ser removido de sua representação ($D(\theta, f) = D(\theta)$).

$$D(\theta, f) = \frac{S(f, \theta)}{S(f)} \quad (1.27)$$

A função $D(\theta, f)$ não é conhecida a priori. Geralmente, especula-se que esta dis-

tribuição apresente seu valor máximo na direção de propagação do vento (afinal, a maior parte da energia das ondas se propaga na direção do vento) e decaia gradualmente nas demais direções. Existem diversas formulações para representar $D(\theta, f)$, sendo o modelo $\cos^2(\theta)$ o mais utilizado:

$$D(\theta, f) = \begin{cases} D(\theta, f) = \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta) & , \text{ para } |\theta| \leq 90^\circ \\ D(\theta, f) = 0 & , \text{ para } |\theta| > 90^\circ \end{cases} \quad (1.28)$$

Onde a direção θ é obtida a partir da direção média de propagação da onda.

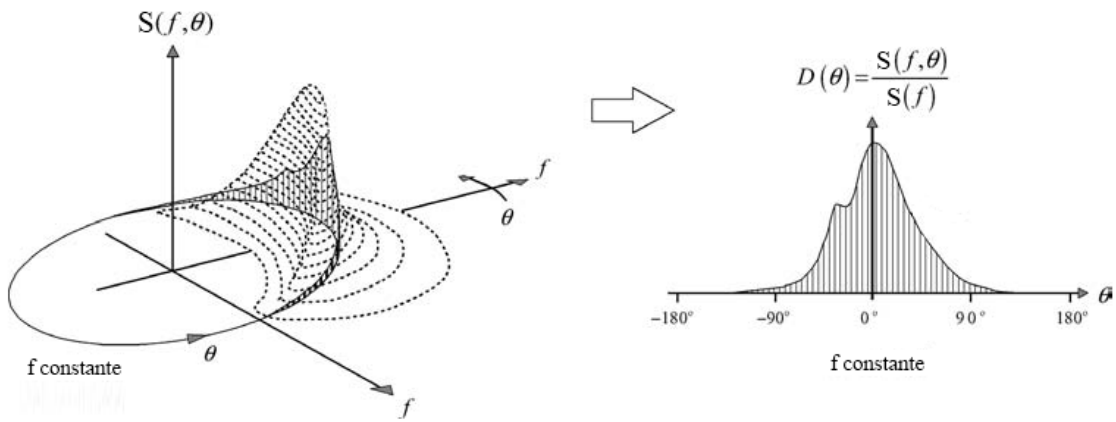


Figura 14 : Representação da distribuição direcional em um espectro bidimensional. Figura baseada em [1].

Desta forma, é possível obter um espectro bidimensional $S(f, \theta)$ a partir do espectro unidimensional $S(f)$ e do espalhamento direcional $D(\theta, f)$.

A partir das formulações de espectro unidimensional de ondas e do espalhamento direcional pode-se gerar um espectro direcional de ondas associado.

Outra formulação importante é a do espectro de número de onda bidimensional. Este caso considera o tempo fixo (como se fosse tirada uma foto da superfície do mar).

Neste caso, as ondas harmônicas podem ser representadas da seguinte forma:

$$\eta(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \underline{a_{i,j}} \cos(k_{x,i}x + k_{y,j}y + \underline{\phi_{i,j}}) \quad (1.29)$$

E o espectro de número de onda bidimensional, $S(k_x, k_y)$, é definido analogamente ao caso anterior:

$$S(k_x, k_y) = \lim_{\Delta k_x \rightarrow 0} \lim_{\Delta k_y \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta k_x \Delta k_y} \text{Var}[\eta(\mathbf{x}, \mathbf{y})] \quad (1.30)$$

A figura Figura 15 apresenta um exemplo de espectro bidimensional de número de onda.

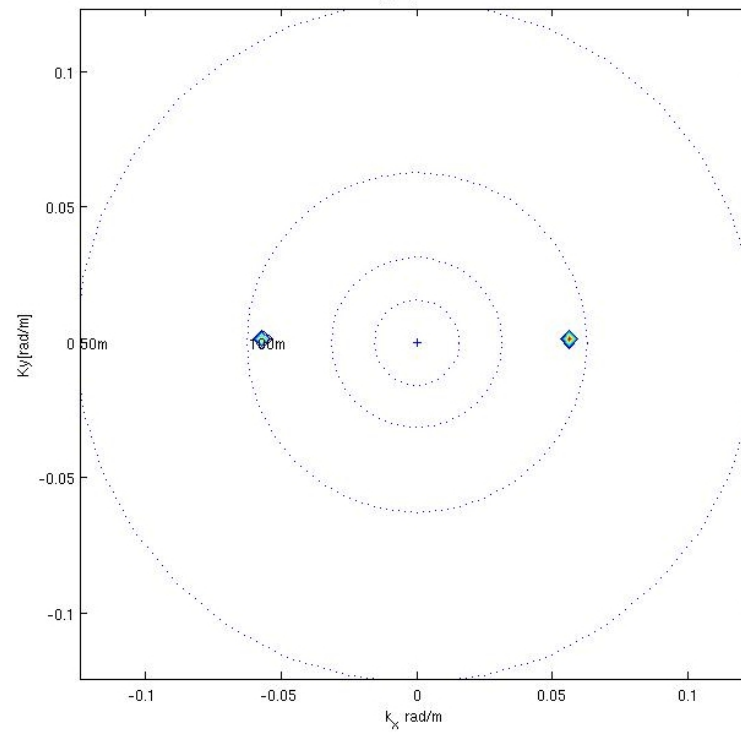


Figura 15 : Espectro de número de onda bidimensional apresentado em coordenadas polares.

2 IMAGEAMENTO DA SUPERFÍCIE DO OCEANO ATRAVÉS DO SAR

Um sistema SAR, operando em um satélite ou aeronave, transmite sinais e recebe o retroespalhamento causado pelo alvo. Em termos de sensoriamento remoto dos oceanos, este retroespalhamento está diretamente relacionado à rugosidade da superfície do oceano. As frequências de operação da maioria dos sensores SAR (0.4 a 10GHz, equivalentes a um comprimento de onda variando de 3 a 75cm), acabam por determinar que o sinal não seja refletido ou alterado por gotículas de água. Desta forma, os sinais emitidos por um sistema SAR não sofrem grandes alterações devido a presença de nuvens.

O SAR alcança sua alta resolução (quando comparado a outros sensores orbitais) de cerca de 25 a 50 metros através de sua geometria de visada lateral, mais precisamente rastreando a transmissão e o retorno de seus sinais e detectando as frequências Doppler.

O sinal retroespalhado é uma interação complexa do sinal transmitido, cujas características são determinadas pela frequência de operação do radar, sua polarização, sua geometria de imageamento e também pela superfície iluminada (rugosidade, propriedades elétricas e composição material).

A intensidade do sinal retroespalhado é função da altura das ondas encontradas na superfície do oceano cujos comprimentos são da mesma ordem das ondas eletromagnéticas emitidas pelo radar. A rugosidade da superfície do oceano se apresenta na forma de ondas curtas (variando entre ondas capilares e ondas de gravidade de pequeno comprimento - com comprimentos de onda variando de poucos centímetros até poucas dezenas de centímetros e com períodos inferiores à um segundo) geradas pelo vento. As ondas centimétricas, na transição capilar-gravidade, são moduladas pelas ondas de maior comprimento, tornando estas detectáveis pelo SAR.

As feições do oceano vistas através de imagens SAR compreendem basicamente as ondulações ou marulhos (do inglês *swell*, que são ondas que já saíram da área de geração e não recebem mais energia do vento), estruturas de circulação de mesoescala (correntes e vórtices, por exemplo), manchas de óleo e manifestações superficiais de fenômenos subsuperficiais (como ondas internas, correntes subsuperficiais, etc). O SAR efetivamente mede a altura das ondas na faixa capilar-gravidade encontradas na superfície do oceano, e qualquer fenômeno que altere estas ondas se torna então detectável. Portanto, em situações em que o vento apresenta pouca intensidade, geralmente inferior a dois ou três

metros por segundo, estas ondas não estão presentes o que impossibilita a detecção de qualquer feição pelo SAR. Por outro lado, na presença de ventos de intensidade elevada, algumas feições podem perder suas características, não sendo mais detectadas.

2.1 Princípios da operação de um RADAR

O termo RADAR (*Radio Detection and Ranging*) refere-se a um dispositivo capaz de detectar a distância ou a velocidade de um alvo a partir do envio e recebimento de ondas eletromagnéticas. A detecção dos alvos e o cálculo das suas distâncias e velocidades podem ser efetuadas através do intervalo de tempo entre a transmissão e recepção de um sinal de rádio (figura Figura 16) ou através da diferença entre suas frequências. A formulação baseada no intervalo de tempo normalmente emprega a técnica de modulação de amplitude (AM, da sigla em inglês) e a formulação baseada na diferença de frequência normalmente emprega a técnica de modulação de frequência (FM, da sigla em inglês).

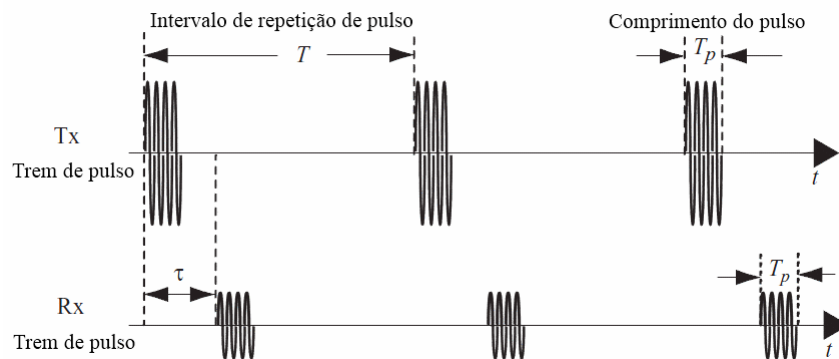


Figura 16 : Diagrama simplificado da transmissão e recepção de sinais. Figura baseada em [4].

Um sistema típico de RADAR pode ser dividido em seis blocos essenciais, como mostra a figura Figura 17.

O gerador de ondas produz e controla a modulação e transmissão das ondas eletromagnéticas. Dependendo da aplicação pode-se usar a modulação de amplitude, a modulação linear de frequência, dentre outras.

O sistema transmissor gera pulsos ou ondas eletromagnéticas a intervalos de tempo precisos e os envia para o sistema de antenas.

O sistema de antenas direciona a energia do transmissor e a irradia através de um feixe direcional. Este sistema também capta a energia do eco(retorno) e a transmite ao

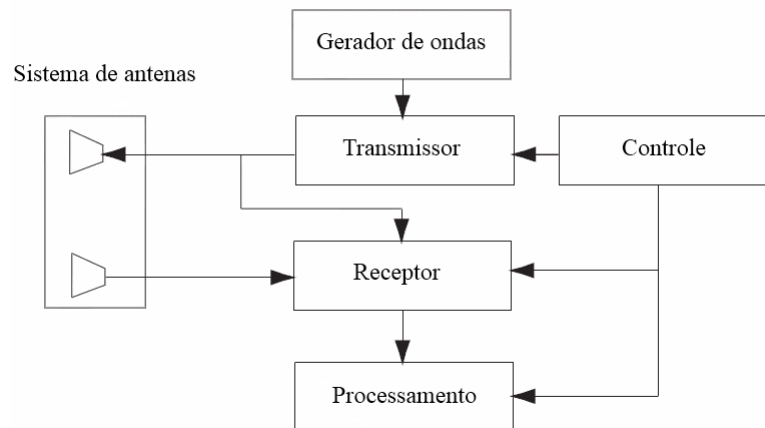


Figura 17 : Diagrama de blocos de um sistema de RADAR. Figura baseada em [4].

sistema receptor com mínima perda de energia. Este sistema inclui funções de transmissão e recepção de sinais. Quando há antenas distintas para cada função, é chamado de biestático. Quando há apenas uma antena para as duas funções, o sistema é chamado de monoestático.

O sistema de recepção capta a energia refletida nos alvos usando o sistema de antenas (uma parcela da energia incidente no alvo é espalhada na direção do próprio sensor, o que é chamado de retroespalhamento - *backscattering*). Então, efetua a amplificação, filtragem e demodulação do sinal recebido. Feito isso, o sinal preprocessado é enviado para o sistema de processamento.

O sistema de processamento efetua cálculos matemáticos complexos usando o sinal demodulado para obter a velocidade ou a distância do alvo.

O sistema de controle gerencia todos os demais blocos garantindo o devido sincronismo de toda a operação.

2.2 RADAR de Abertura Sintética

O RADAR de Abertura Sintética (SAR, na sigla em inglês) é um sistema aerotransportado(aeronaves) ou orbital(satélites) utilizado para o sensoriamento remoto. Trata-se basicamente de um RADAR de características convencionais instalado em uma plataforma móvel de forma a apresentar uma visada lateral em relação ao deslocamento da mesma, de forma a definir dois eixos básicos: Eixo azimuthal (relativo à direção do voo do sensor) e eixo radial ou "de *range*", perpendicular ao primeiro.

Sua teoria básica surgiu no início da década de 50, quando o cientista Carl Wiley observou que existia uma relação entre a coordenada azimutal de um objeto e a frequência Doppler instantânea de seu sinal refletido. Ele concluiu que a análise da frequência dos sinais refletidos permitiria uma melhora na resolução azimutal.

Existem diversas configurações de sistemas SAR bem como diversos modos de operação. Porém, destacam-se os três modos mais comuns (figura Figura 18):

- *Stripmap SAR* - Efetua uma varredura de uma área longa durante seu deslocamento;
- *Scan SAR* - Efetua uma varredura mais abrangente na direção de *range* emitindo sinais por feixes mais inclinados ao longo de sua trajetória;
- *Spotlight SAR* - Efetua diversas varreduras sobre um mesmo ponto fixo (varreduras com diversas inclinações). Este modo de operação apresenta resoluções melhores em relação aos apresentados anteriormente.

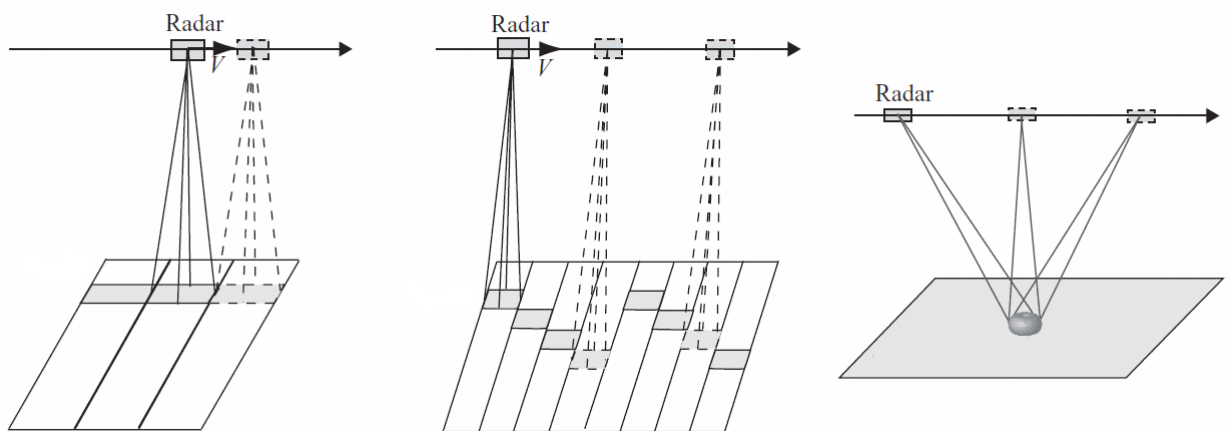


Figura 18 : Modos de operação SAR mais comuns. Figura baseada em [4].

Além dos modos de operação descritos acima, existem outras técnicas para processamento de imagens de RADAR. A técnica de Interferometria SAR (InSAR) tem sido amplamente utilizada em diversas aplicações por se utilizar de múltiplas antenas ou diferentes geometrias de aquisição de dados, como mostra a figura Figura 19.

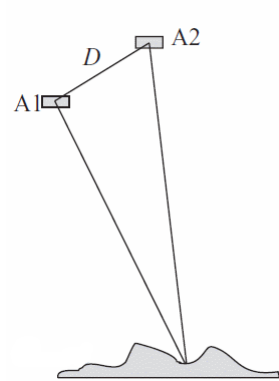


Figura 19 : Diagrama simplificado da técnica InSAR. Figura baseada em [4].

Para um melhor entendimento da geometria de voo de um SAR, a Figura 20 ilustra os principais elementos que descrevem a configuração de um sistema operando em uma plataforma móvel.

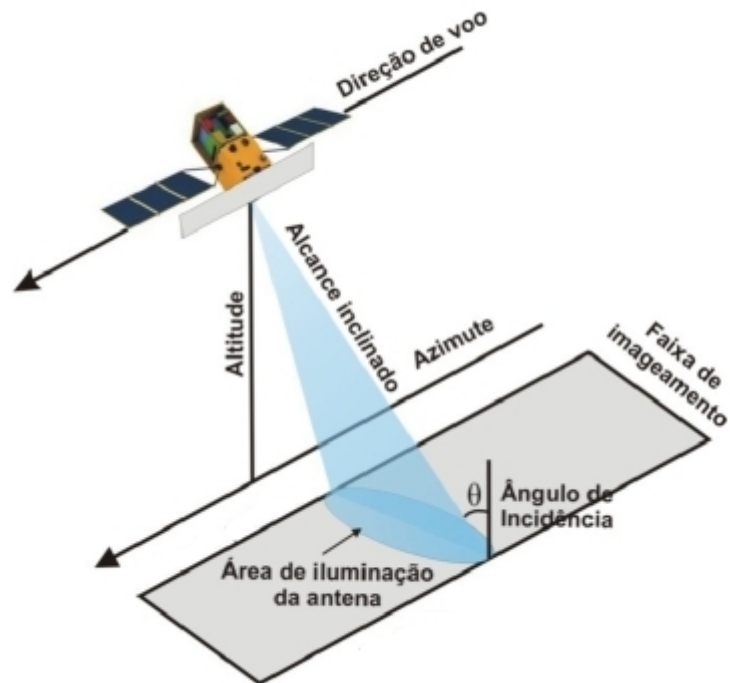


Figura 20 : Geometria de imageamento por radar. Figura baseada em [5].

2.3 Parâmetros básicos do sistema

2.3.1 Polarização

A polarização se refere à orientação do campo elétrico utilizado. As antenas de um sistema radar podem ser configuradas para transmitir e receber a radiação eletromagnética polarizada horizontal ou verticalmente. A polarização é definida como paralela quando as energias transmitida e recebida são polarizadas na mesma direção. HH indica sinal transmitido e recebido horizontalmente; VV sinal transmitido e recebido verticalmente. A polarização é definida como cruzada quando o sinal transmitido e recebido são polarizadas ortogonalmente (HV, VH) [16]. A Figura 21 representa esquematicamente as direções de propagação do campo elétrico.

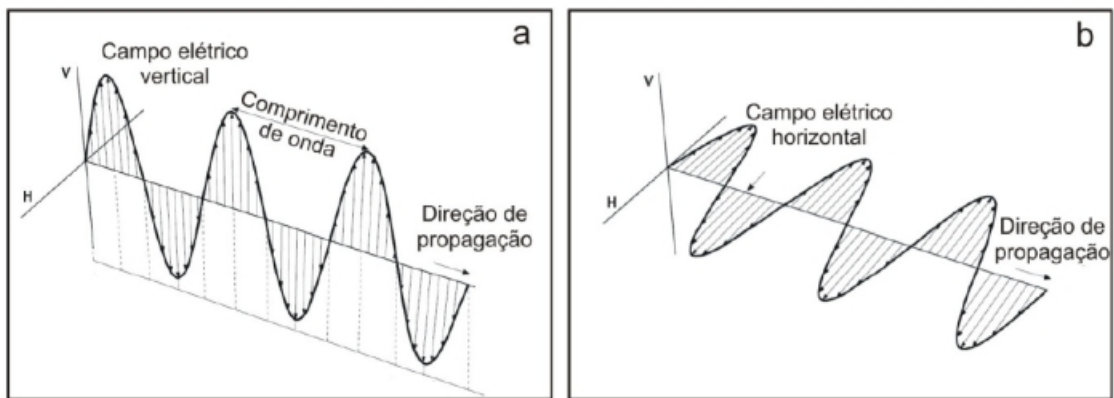


Figura 21 : Direções de propagação do campo elétrico: a - polarização vertical e b - polarização horizontal. Figura baseada em [5].

Quando a onda de radar incide em uma superfície e é refletida, a polarização pode ser modificada, segundo as propriedades da superfície. Tal modificação afeta o modo como o alvo aparece nas imagens polarimétricas de radar. Assim, as imagens de radar registram não só a intensidade da energia retroespalhada pela superfície, como também sua capacidade de alterar a polarização da radiação, para isso é necessário considerar a informação da diferença de fase [17].

Segundo [18], a profundidade de penetração da radiação também é influenciada pela polarização, levando em consideração um comprimento de onda fixo.

2.3.2 Efeito Doppler

Para transmissores e receptores de sinal distintos e estacionários, os valores de frequência e comprimento de onda dos sinais transmitidos serão os mesmos percebidos no receptor. A figura Figura 22 mostra a fonte S emitindo sinais e o alvo R, ambos estacionários.

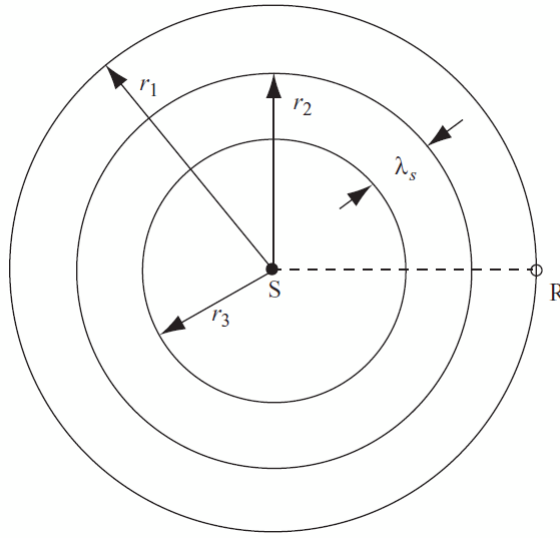


Figura 22 : Propagação de sinal (ondas) entre pontos estacionários. Figura baseada em [4].

Quando o transmissor do sinal se move (seja se aproximando ou se afastando do receptor), ocorre uma diferença de frequência entre o sinal emitido e o recebido. Esta diferença recebe o nome de frequência Doppler.

A figura Figura 23 mostra um exemplo desta ocorrência. O transmissor do sinal, S, inicialmente ocupa a posição S_1 , passando a S_2 e a S_3 sucessivamente com deslocamento d . Em virtude deste movimento o centro das circunferências correspondentes aos sinais emitidos também se deslocam gerando a diferença de frequência percebida pelo receptor R.

Quando a variação da frequência Doppler é positiva, pode-se concluir que o transmissor e o receptor estão se aproximando. Quando seu valor é negativo, pode-se concluir que o transmissor e o receptor estão se afastando.

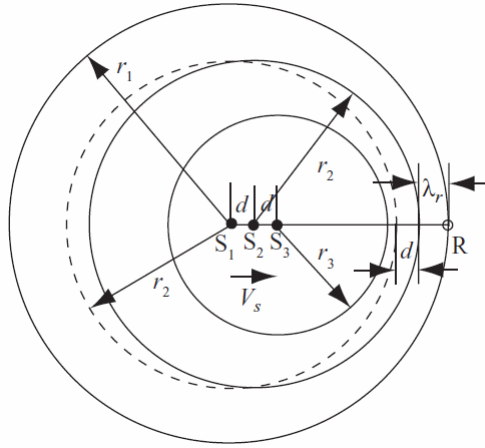


Figura 23 : Detalhamento da ocorrência do efeito Doppler. Figura baseada em [4].

2.3.3 Resolução e Ambiguidade do RADAR

A função principal de um sistema de RADAR é detectar alvos de interesse e estimar sua posição e velocidade. A determinação da distância e velocidade dependem da exatidão das medidas de intervalo de tempo e frequência Doppler, que estão relacionadas diretamente com as propriedades fundamentais do RADAR.

A resolução de distância do sistema de RADAR é a capacidade de distinguir dois objetos separados por uma distância mínima. Se os objetos estiverem adequadamente separados, ambos serão representados em células de resolução diferentes. Caso contrário, o radar apresentará uma combinação complexa da energia refletida por esses objetos em uma mesma célula de resolução. Neste caso, define-se o conceito de ambiguidade do RADAR. A figura Figura 24 exemplifica os dois casos.

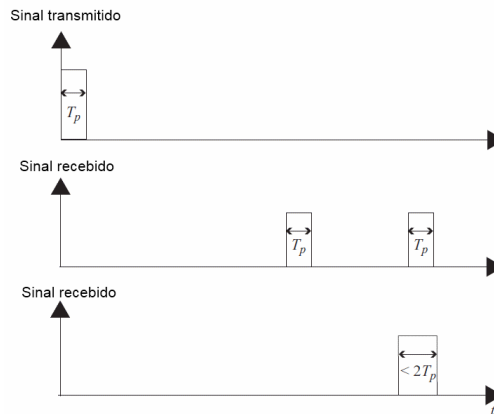


Figura 24 : Detalhamento da resolução de distância e ambiguidade do RADAR. Figura baseada em [4].

No sistema SAR, a resolução espacial é medida nas direções de azimute e *range* sendo controlada pelas características do sistema radar e do sensor.

A resolução *range* de um SAR é medida ao longo da direção de iluminação do radar e é proporcional ao comprimento do pulso processado. Quanto menor o comprimento do pulso, mais detalhada é a resolução em *range*. Os dados de radar são gerados no plano inclinado da imagem (*slant-range*), mas normalmente são projetados sobre o plano do terreno (*ground-range*) quando processados em uma imagem. A resolução em azimute em um sistema SAR é dada pelo comprimento da antena dividido por dois [19]. A figura Figura 25 mostra em detalhe as células de resolução da imagem, baseadas na resolução azimutal e de *range*.

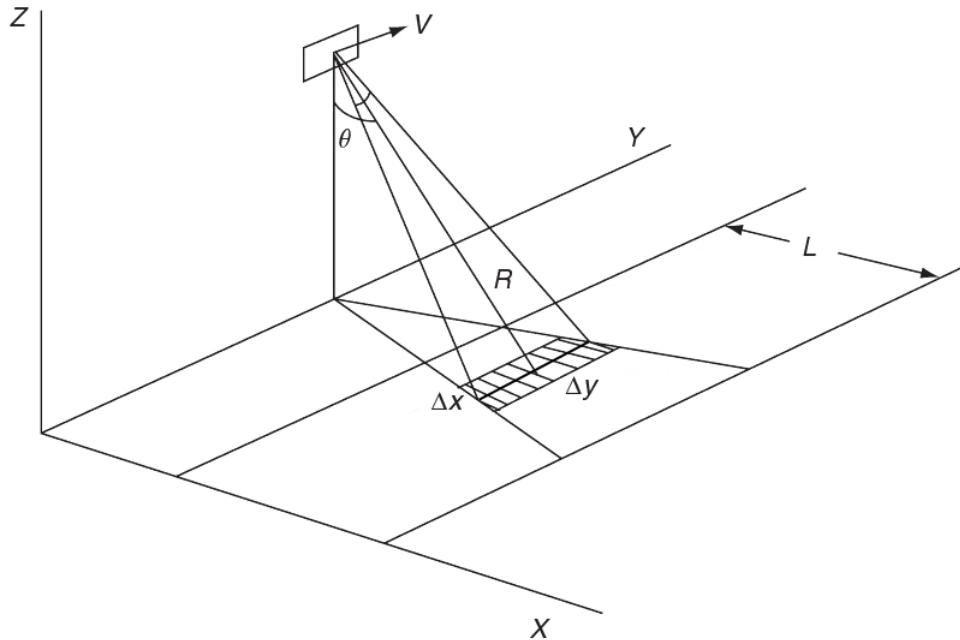


Figura 25 : Célula de resolução. Δx é a resolução em range e Δy é a resolução azimutal. Figura baseada em [6].

2.3.4 Ângulo de incidência

O ângulo de incidência (θ) é o ângulo entre a direção de iluminação do radar e a normal à superfície do solo (Figura Figura 26). O ângulo de incidência varia de acordo com a trajetória do radar e de sua distância até o alvo. Essa mudança de ângulo afeta a geometria de visada. O ângulo de incidência local (α) é um termo que leva em consideração o declive local do terreno em qualquer ponto da imagem. Este ângulo determina

parcialmente o brilho ou a tonalidade de cada pixel. Desta maneira, a declividade do local pode produzir um efeito significativo sobre o brilho da imagem. Quando o ângulo de incidência diminui e a declividade do terreno permanece constante existe uma correspondência com o ângulo de incidência local, que também diminui. Em superfícies planas, o retroespalhamento e o ângulo de incidência são inversamente proporcionais.

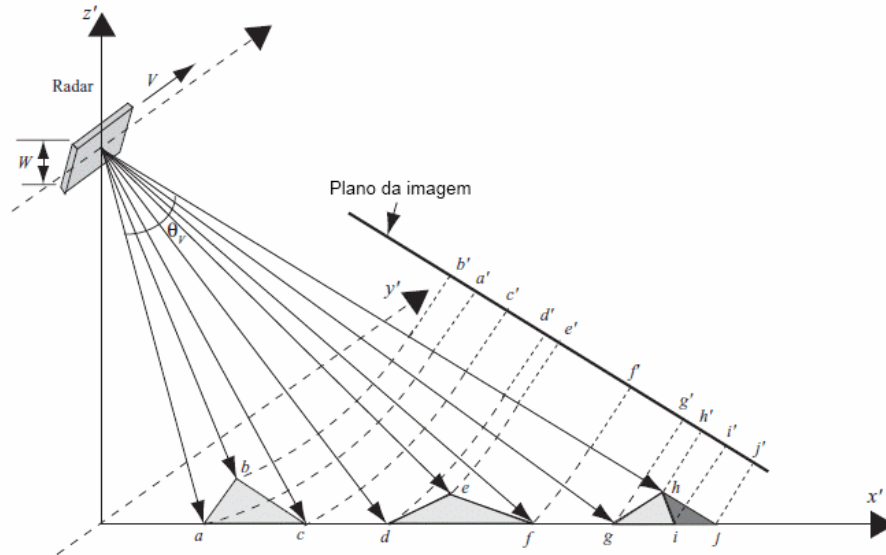


Figura 26 : Distorções na imagem decorrentes da variação da inclinação e da superfície. Figura baseada em [4].

O coeficiente de retroespalhamento é fortemente influenciado pelo ângulo de incidência. Diferentes superfícies podem ter seu sinal diferenciado em função do comportamento angular do retroespalhamento [20] [21].

2.3.5 Direção de visada

A direção de visada é definida como o ângulo entre o norte geográfico e a direção do feixe de iluminação do radar em sentido horário, ou seja, perpendicular à direção de movimento da plataforma [19].

Em sistemas de visada fixa, como é o caso do sistema RADARSAT-1, pode-se adquirir duas direções de visada, utilizando-se as passagens de órbita ascendente (visada para leste) e descendente (visada para oeste), como ilustrado na Figura 27.

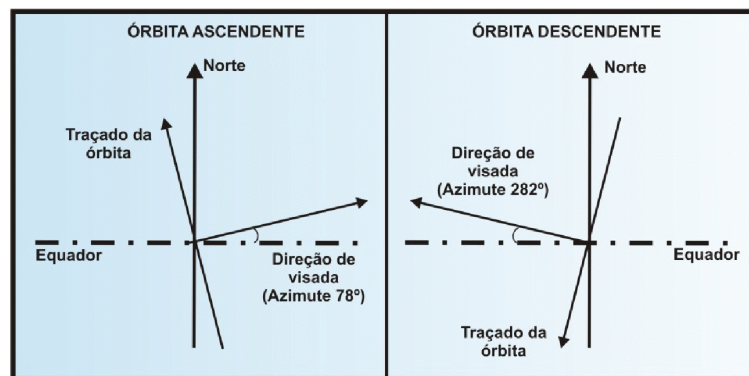


Figura 27 : Direções de visada do sistema RADARSAT. Figura baseada em [5].

2.3.6 Rugosidade da superfície imageada

A rugosidade superficial é a propriedade da superfície que influencia fortemente a intensidade do retroespalhamento, normalmente definida em termos das variações estatísticas da altura e extensão das irregularidades da superfície.

Superfícies horizontais lisas refletem quase toda energia incidente na direção oposta ao radar, fenômeno este chamado de reflexão especular, no qual essencialmente nenhuma radiação é retroespalhada na direção do radar. Estas superfícies aparecem com tons de cinza mais escuros nas imagens de radar. A radiação incidente sobre superfícies de rugosidade intermediária é refletida de uma forma mais difusa, entretanto não homogênea e deve produzir uma resposta em um tom de cinza médio. A radiação de micro-ondas que incide em uma superfície rugosa apresenta um retroespalhamento em todas as direções, incluindo na direção do radar, recebendo o nome de reflexão difusa. As superfícies rugosas aparecem com tons de cinza mais claros nas imagens de radar.

A figura 28 mostra os três modelos de retroespalhamento citados acima.

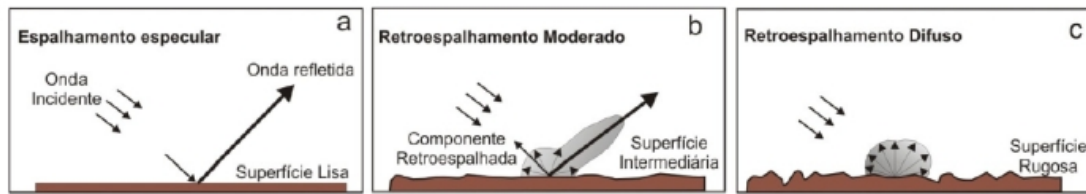


Figura 28 : Modelo de padrões de espalhamento para uma superfície horizontal: a- superfície lisa; b- superfície intermediária e c- superfície rugosa. Figura baseada em [5].

Dado um comprimento de onda, uma determinada superfície parece mais rugosa à medida que o ângulo de incidência aumenta. Como pode ser observado na Figura Figura 29, pequenas mudanças no ângulo de incidência, menores que 20° a 25° resultam em mudanças relativamente grandes na intensidade do retorno [19].

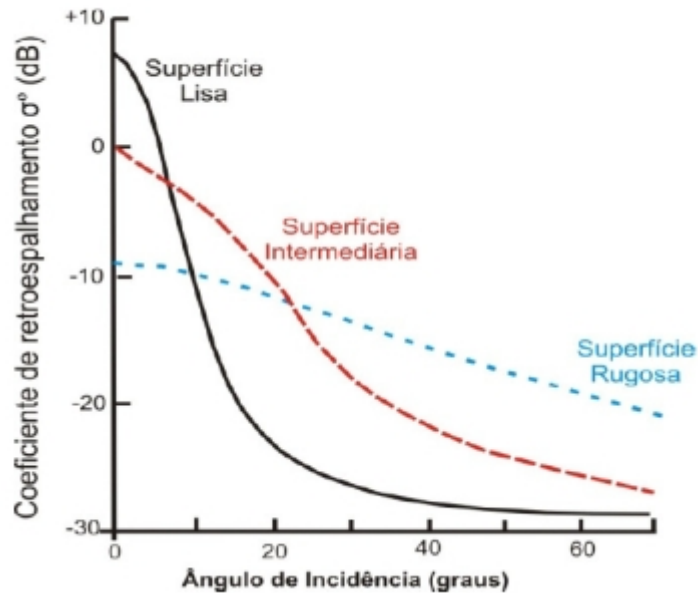


Figura 29 : Curvas típicas de retroespalhamento para superfícies lisas, moderadamente rugosas e muito rugosas. Figura baseada em [5].

2.3.7 A constante dielétrica e a profundidade de penetração

É importante destacar que as microondas do SAR não penetram além de alguns milímetros da camada limite da superfície do oceano. Ou seja, todas as feições que podem ser percebidas pelo SAR, mesmo as que são relacionadas a fenômenos subsuperficiais ou atmosféricos, são identificados por alterações no campo de ondas de Bragg (na superfície).

Tal penetração é influenciada diretamente pela constante dielétrica do meio a ser imageado.

A constante dielétrica caracteriza a reação do meio à presença de um campo elétrico. Então o sinal do radar interagindo com a água, gelo ou precipitação alterará a atividade das moléculas carregadas conforme as propriedades do meio.

A constante dielétrica, ou permissividade complexa, ε_c é descrita como

$$\varepsilon_c = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (2.1)$$

onde ε' é a parte real e ε'' é a parte imaginária. A parte real, também chamada de constante dielétrica propriamente dita, descreve a habilidade do meio de armazenar energia elétrica. A parte imaginária, também conhecida como fator de perda, descreve a perda eletromagnética do meio. A tangente de perda, $\tan \varepsilon''/\varepsilon'$, descreve se o material é um bom condutor.

No intervalo de frequência de 1 a 10GHz, a profundidade de penetração no oceano é da ordem de 0.1 a 1.0 cm.

2.4 A superfície do oceano e o espalhamento do sinal de radar

A superfície do oceano é onde ocorrem praticamente todas as trocas de calor, quantidade de movimento, luminosidade, partículas de água e gases entre a atmosfera e o oceano. Desta forma, a maioria dos instrumentos de sensoriamento remoto (que por suas características detectam sobretudo as feições superficiais) são de grande interesse científico.

Para desenvolver um entendimento sobre os dados obtidos com esses instrumentos são necessárias algumas considerações sobre como a superfície do oceano interage com sua parte subsuperficial e com a atmosfera.

Uma imagem SAR sobre o oceano consiste de um mapa bidimensional de alta resolução do retroespalhamento do sinal emitido, que está diretamente relacionado com a rugosidade da superfície imageada. O sinal retroespalhado pelo oceano é controlado basicamente pelos seguintes fatores:

- Constante dielétrica;
- Rugosidade da superfície do oceano;
- Interação de ondas de diferentes escalas;

- Interação das ondas com as correntes;
- Presença de óleo na superfície.

Para sensores ativos de microondas, como o SAR, a rugosidade da superfície do oceano é composta pela média das inclinações da superfície, dominado pelo campo de ondas longas, e pelas ondas curtas (também chamadas de ondas de Bragg).

A intensidade do sinal retroespalhado, chamada de seção cruzada do radar normalizada (NRCS, da sigla em inglês) ou coeficiente de espalhamento (representado por σ_0) é o valor médio da energia incidente em uma determinada área A (medida em m^2), representada por σ , retroespalhada para a antena. σ_0 é adimensional apresentada em decibéis (dB), onde

$$\sigma_0 = 10 \log(\sigma/A) \quad (2.2)$$

Além das propriedades físicas e elétricas e a inclinação local do meio refletido, o valor de σ_0 depende das características do radar incluindo frequência, polarização, ângulo de visada e de incidência.

Na ausência de ventos, a superfície do oceano se encontra espelhada refletindo o sinal do radar de forma especular não gerando nenhum retorno ao sensor. Ondas longas, incluindo marulho e ondas internas, correntes, e fenômenos atmosféricos causarão alterações no campo de ondas de Bragg de forma a serem identificáveis em uma imagem SAR. Desta forma, a chave para o entendimento de uma imagem SAR do oceano é conhecer essas alterações geradas pelos fenômenos oceanográficos e atmosféricos.

2.4.1 Interações entre ondas curtas e ondas longas

Além da presença das ondas de Bragg em si (em geral associada ao vento), é importante destacar a importância de se considerar a interação entre as ondas de Bragg com ondas de escala intermediária e correntes subsuperficiais na análise das intensidades dos sinais retroespalhados.

No caso das ondas de escala intermediária, sua inclinação, altura e movimento orbital modulam as ondas de Bragg, produzindo alterações na imagem de radar que podem ser detectadas com a alta resolução das imagens SAR.

A interação das ondas curtas e longas e como essas interações afetam o retroespalhamento do sinal do radar são denominadas de 'aproximação de duas escalas'. Existem três mecanismos principais a partir dos quais ondas longas modificam as ondas de Bragg, tornando-se detectáveis em imagens SAR:

- Modulação de Inclinação ou *Tilt* - A variação da inclinação das ondas longas alteram a orientação local das ondas de Bragg. Desta forma, as ondas de Bragg também terão sua inclinação alterada, modificando o espalhamento do sinal do radar;
- Modulação Hidrodinâmica - A velocidade orbital das ondas longas gera áreas de convergência e divergência de ondas curtas, empilhando-as ou espalhando-as;
- Modulação de *Velocity bunching* - O movimento orbital de ondas longas se propagando na direção azimutal gera uma alteração na frequência Doppler recebida pelo radar induzindo a geração de um deslocamento da posição do alvo na imagem.

Os efeitos não lineares associados à dinâmica da cena imageada, basicamente representados pela modulação de *velocity bunching*, acabam gerando uma limitação na detecção de ondas de elevado número de onda. Este efeito é chamado de *cutoff* azimutal.

A figura Figura 30 exibe o esquema simplificado de cada modulação citada acima.

Deve-se destacar que quando ondas longas se propagam em águas rasas, as trajetórias orbitais se tornam elípticas (com o eixo mais longo na horizontal), o que também altera a interação das ondas longas e curtas.

As modulações de inclinação e hidrodinâmica apresentam efeitos mais expressivos no retroespalhamento quando as ondas longas se propagam na direção de *range*. Ambos mecanismos são mais significativos na polarização horizontal em relação à polarização vertical.

É importante destacar que a abordagem pela 'aproximação de duas escalas', apresentada acima, é suficiente para um considerável entendimento do mecanismo de retroespalhamento de sinal de radar por parte da superfície do oceano. Porém, existem formulações complementares considerando outros parâmetros de satélite, radar e oceano.

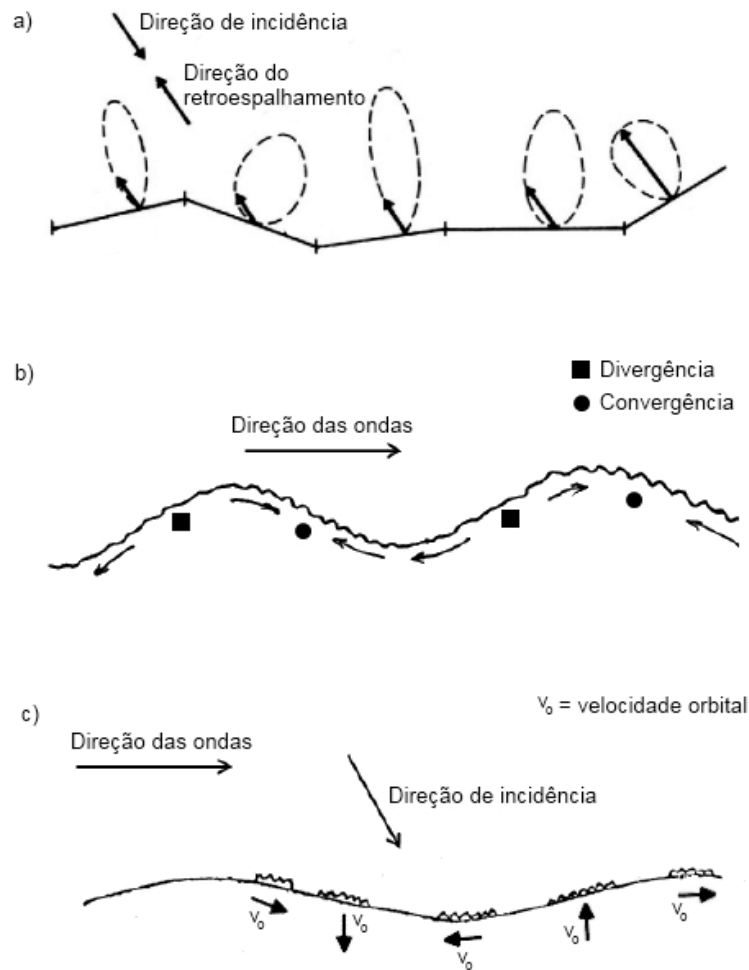


Figura 30 : Modulação de inclinação ou *tilt*, modulação hidrodinâmica e modulação de *Velocity Bunching*. Figura baseada em [7].

2.4.2 Interação de ondas curtas e correntes

A interação de um campo de ondas superficiais e correntes produz uma troca de energia e quantidade de movimento que pode alterar de forma significativa o campo de ondas em diversas escalas de comprimentos de onda, incluindo a escala das ondas de Bragg. Inicialmente, deve-se considerar que a interação onda-corrente pode aumentar ou reduzir o retroespalhamento do sinal do radar em comparação com o comportamento local.

Esta interação é influenciada pela intensidade e direção dos ventos, estratificação da camada limite, temperatura da superfície do oceano e pela presença de manchas de óleo superficiais.

Interações onda-corrente que são percebidas pelo SAR compreendem geralmente

as seguintes categorias:

- Alterações no movimento orbital das partículas a partir de zonas de convergência e divergência subsuperficiais induzidas por correntes;
- Alterações na velocidade ou direção de propagação do campo de ondas curtas devido ao escoamento horizontal das corrente;
- Alterações na estabilidade da camada limite a partir de alterações significativas da temperatura da superfície do oceano.

Em geral, essas três categorias têm contribuição em todas as feições detectadas pelo sensor.

O sinal retroespalhado por conta das interações onda-corrente serão variáveis de acordo com os diversos parâmetros do sistema SAR, o que inclui a frequência, polarização e geometria de imageamento em relação à direção de propagação da corrente e vento.

Alguns exemplos de feições detectadas a partir da interação onda-corrente: ondas internas, variação nas correntes superficiais por conta da batimetria, etc.

Embora a interação onda-corrente já seja razoavelmente conhecida, ainda não há resultados definitivos em sua implementação na interpretação de imagens SAR.

2.4.3 Manchas de óleo na superfície do oceano

Manchas de óleo na superfície do oceano são detectadas pelo SAR a partir de regiões com reduzido retroespalhamento. A característica viscoelástica do óleo impede o desenvolvimento das ondas curtas e facilitam sua dissipação (aumentando a tensão superficial e reduzindo a fricção do vento).

Manchas de óleo podem ser confundidas com áreas com intensidade de vento reduzida e outras feições de reduzido retroespalhamento (como massas de água de menor temperatura). Em geral, a distinção entre manchas de óleo e áreas de pouca intensidade de vento (especialmente em regiões com escoamento de óleo, como áreas de exploração de petróleo.) é realizada a partir de imageamento repetido (imagens sucessivas) associado ao conhecimento do campo de ventos do local (dados medidos ou estimados).

O óleo também pode ser distribuído por correntes, vórtices e ondas internas de forma característica, determinando mecanismos específicos de detecção dessas feições.

2.5 Características das feições da imagem SAR sobre o oceano

Esta seção visa apresentar as feições mais comuns presentes em uma imagem SAR sobre o oceano bem como destacar a grande quantidade de informações que podem ser extraídas a partir da camada superficial do oceano e das interações ar-mar.

2.5.1 Ondas superficiais

Imagens SAR mapeando ondas superficiais do oceano foram analisadas e utilizadas para diversas aplicações. A alta resolução do SAR (chegando a cerca de 25m) o torna uma ferramenta potencialmente interessante para extração de parâmetros de onda.

O espectro direcional das ondas obtido a partir de imagens SAR fornece informações sobre a evolução espacial de campos de onda regionais e globais e sua refração por conta de correntes e vórtices.

Ondas superficiais são detectáveis em imagens SAR devido especialmente à três mecanismos discutidos na seção 2.4.1: Modulação de Inclinação, modulação hidrodinâmica e modulação de *Velocity Bunching*. Sendo esta última de extrema importância considerando as severas distorções não lineares que gera no espectro direcional de ondas se propagando na direção azimutal.

Geralmente, a informação da direção de propagação das ondas é fornecida com ambiguidade direcional de 180°, o que pode ser resolvido através do uso de dados meteorológicos ou oceanográficos independentes. Tal limitação é eliminada com o emprego de imagens adquiridas sucessivamente em curtos intervalos de tempo, como as imagens geradas pelo satélite Envisat, por exemplo.

Ondas superficiais podem ser notadas em uma imagem SAR como padrões de pequena escala onde as cristas são mais claras e os cavados mais escuros que a aparência geral da imagem. A escala das ondas detectáveis pelo SAR pode ser associada à seus comprimentos de onda, entre 100 e 600 metros.

A figura Figura 31 mostra um exemplo de imagem SAR com ondas se propagando na direção de *range*.

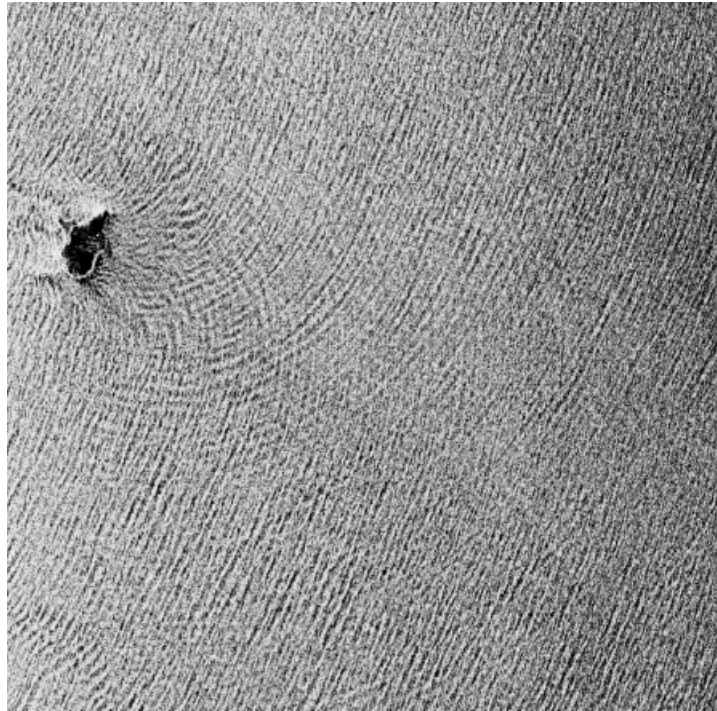


Figura 31 : Imagem SAR destacando ondas superficiais se propagando na direção de *range*. Imagem do satélite RADARSAT-1.

2.5.2 Ondas Internas

As ondas internas se manifestam na superfície do oceano através da interação de seu campo de corrente com as ondas superficiais. Essa interação foi modelada baseada no gradiente horizontal da corrente superficial. As ondas internas se propagam como pacotes ou grupos de ondas, caracterizadas por cristas curvilíneas e por comprimento de ondas decrescente ao longo do pacote ou grupo (desta forma indicando a direção de propagação). A figura Figura 32 mostra uma imagem SAR com presença de ondas internas.

As feições superficiais decorrentes das ondas internas são basicamente bandas alternadas de ondas capilares de maior e menor altura, devido à modulação causada pelas correntes induzidas pela passagem da onda interna. Sua aparência mais comum é caracterizada por ondas de aparência mais clara com regiões adjacentes mais escuras. As regiões mais claras representam as área de convergência (geradas a partir do movimento orbital induzido pelas próprias ondas internas). Nesta caso, as ondas curtas superficiais são agrupadas na região mais turbulenta da área de convergência. As regiões mais escuras representam as áreas de divergência, que acabam apresentando um campo de ondas curtas de menor altura.

Em geral, as imagens SAR detectam ondas internas com comprimento de onda

entre 0.3 e 3 km.

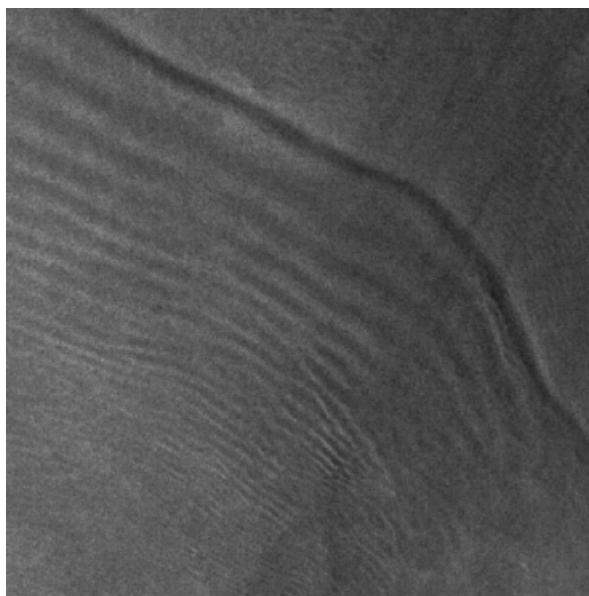


Figura 32 : Imagem SAR destacando ondas internas. Imagem do satélite SEASAT.

2.5.3 Correntes, frentes e vórtices

A capacidade de melhorar o conhecimento da circulação de mesoescala do oceano, particularmente nas regiões costeiras, pode ser a principal contribuição do SAR para a oceanografia.

Ainda que seja possível identificar feições oriundas das correntes de mesoescala, ainda há muito a se desenvolver até que seja possível extrair dados mais detalhados com confiabilidade.

Algumas feições já foram detectadas e analisadas a partir de uma imagem SAR. São elas: Correntes de diversas escalas, vórtices, correntes termais e frontais, etc.

2.5.4 Batimetria

A análise das feições presentes em uma imagem SAR decorrentes da batimetria em águas rasas é bastante semelhante ao caso das ondas internas. Correntes de maré se propagando sobre o fundo ondulado (em águas rasas) produzem padrões nas imagens SAR que permitem a análise das correntes superficiais e a variação da profundidade ao longo do tempo.

2.6 Interações ar-mar

A partir de dados obtidos de satélites com sensores SAR, ficou evidente que algumas feições presentes em imagens SAR eram decorrentes de fenômenos atmosféricos (rajadas de vento, células de chuva, furacões, etc.). Ainda que não sejam obtidas todas as características de cada fenômeno, é possível estimar as condições atmosféricas a partir da escala e particularidades de cada caso.

2.6.1 Ventos superficiais

É evidente que o campo de ventos superficiais é de extrema importância no imageamento SAR. Como apresentado anteriormente, o retroespalhamento é intensificado com o aumento da velocidade do vento.

Por conta de sua comparativamente alta resolução, o sensor SAR obtém dados confiáveis da direção e intensidade dos ventos com relativa precisão (em comparação com outras ferramentas de sensoriamento remoto). Existe alguma limitação na obtenção na direção de propagação (com desvios da ordem de 20° a 30°) mas que podem ser tratados através de métodos complementares (modelagem, assimilação de dados independentes, etc.).

2.6.2 Vórtices atmosféricos

Esses vórtices são caracterizados por circulação em sentido contrário em relação ao escoamento atmosférico. Em geral, são decorrentes de instabilidades na camada limite ar-mar. O eixo longo desses vórtices, em geral, coincidem com a direção média de propagação dos ventos.

Em geral, podem ser identificados em uma imagem SAR como regiões claras adjacentes às regiões escuras com comprimento de onda variando de 1 a 5 km mas que podem chegar até 15km.

2.6.3 Ondas de gravidade

Ondas de gravidade na atmosfera são observadas em uma imagem SAR como distúrbios na estabilidade nas camadas inferiores da atmosfera. Em geral, surgem em declives

do relevo e camadas de gelo. Essas ondas possuem cristas orientadas perpendicularmente à direção de propagação do vento. Seus comprimentos de onda variam entre 2 e 10 km.

Sem o conhecimento dos ventos locais, esta feição pode ser interpretada como um vórtice.

2.6.4 Células de chuva

Em geral, células de chuva podem ser identificadas em uma imagem SAR como feições circulares claras com a parte central escurecida. Seu diâmetro varia de 2 a 40km.

Alguns estudos associaram a parte central escurecida à forte precipitação, que acaba por amenizar o campo de ondas curtas na superfície do oceano. Mas esta questão é dependente da frequência de operação do sistema SAR e da intensidade da precipitação.

Este capítulo foi baseado principalmente nas seguintes referências: [4], [22] e [5]. Suas citações foram mantidas no formato do texto original.

3 PACOTE NEWSAR - MPI

Ainda que a teoria de imageamento do SAR sobre o oceano possa ser considerada como bem compreendida, sua interpretação e aplicações ainda são consideradas como problemas em aberto por conta principalmente das não linearidades presentes no processo de imageamento.

A maior parte dessas limitações, se devidamente compreendidas, podem ser tratadas de forma a permitir a obtenção de dados de onda a partir de uma imagem SAR. Entretanto, isso só seria possível se existisse um método numérico eficiente e com implementação viável para gerar o espectro da imagem SAR a partir de um espectro de ondas (chamado de método direto daqui em diante) e também uma técnica associada para inversão do método anterior. Com o objetivo de atender a esta demanda, foi desenvolvido o algoritmo WASAR-MPI (Wide Angle SAR - Algoritmo desenvolvido por pesquisadores do Max-Planck-Institut).

Considerando que os mecanismos de imageamento são conhecidos, um método bem definido para resolver o método direto é gerar uma imagem SAR para qualquer cenário de elevação da superfície do mar fornecido pixel-a-pixel. Esta etapa pode ser descrita como a geração de diversas realizações da superfície do oceano a partir de um dado espectro de onda, o cálculo da imagem SAR associada através da transformada de Fourier e finalmente com a formação do espectro da variância da imagem SAR.

Neste método, este processo é realizado de uma forma alternativa, associando diretamente o espectro de onda ao espectro de imagem SAR. Esta solução contorna a necessidade do tratamento pixel-a-pixel e é livre das incertezas estatísticas associadas à abordagem original.

A transformação integral final pode ser expandida em uma série de transformadas de Fourier, que podem ser tratadas rapidamente através da transformada rápida de Fourier (FFT, da sigla em inglês).

Finalmente, a partir do resultado do método direto, é possível tratar do método inverso (obter o espectro de ondas associado a um espectro da imagem SAR dado). Devido à questão da ambiguidade direcional e do *cutoff* azimutal, não é possível gerar uma transformação inversa com rigor. Entretanto, uma aproximação pode ser obtida através da minimização de uma função de custo que penaliza não somente o desvio entre o espectro

da imagem SAR previsto e o observado mas também o desvio entre o espectro de onda modificado (gerado a partir da inversão) e o de entrada (também chamado de *first guess* - Em geral trata-se de um espectro de onda criado a partir de um modelo de propagação de ondas).

O método iterativo de inversão utilizado pelo WASAR converge, em geral, após três ou quatro iterações. Os cálculos são efetuados em tempo suficiente para considerar o uso da ferramenta em regime operacional.

3.1 Método direto

Um fator de destaque na teoria do imageamento SAR é que trata-se de um processo não linear. Ainda que as funções de modulação de inclinação e hidrodinâmica possam ser consideradas como processos lineares, a modulação de *velocity bunching*, em geral, é um processo altamente não-linear (principalmente para ondas de gravidade de menor comprimento). Quando o alvo é erroneamente deslocado na imagem de uma distancia pequena em relação ao comprimento de onda das ondas longas, este mecanismo pode ser tratado como linear. Porém, quando os desvios não atendem à esta restrição, a imagem em questão pode sofrer com grandes distorções.

Considerando que a não-linearidade da modulação de *velocity bunching* é extremamente significativa em relação às não-linearidades oriundas das outras modulações, pode-se simplesmente ignorar essas últimas para evitar complicações na análise. Mas deve-se ressaltar que os termos ignorados podem ser facilmente adicionadas, se desejado.

Ao se imagear um alvo não estacionário como é o caso da superfície do oceano é conveniente considerar a geração da imagem a partir de dois mecanismos básicos: A superfície estática (ou radar de abertura real, RAR) - influenciado pelas modulações de inclinação, hidrodinâmica e *range bunching*- e os efeitos adicionais decorrentes dos movimentos inerentes ao sistema SAR.

No método direto, a expressão $P(\vec{k}) = \Phi(F(\vec{k}))$ associa o espectro de onda $F(\vec{k})$, empregado como *first guess* e geralmente obtido através de um modelo de ondas, a um espectro de imagem SAR $P(\vec{k})$ através de uma transformada integral fechada.

$$P(\vec{k}) = \exp(-k_x^2 \xi'^2) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=2n-2}^{2n} (k_x \beta)^m P_{nm}(\vec{k}) \quad (3.1)$$

Onde:

- $\vec{k}$ é o vetor número de onda de componentes k_x e k_y . Sendo k_x a componente na direção azimutal;
- β é a razão entre a distância da plataforma ao ponto imageado e a velocidade da plataforma;
- P_{nm} são os fatores espectrais das transformadas de Fourier associados à velocidade orbital na direção de *range* e a modulação RAR (Inclinação e hidrodinâmica);
- O índice n indica a ordem de não-linearidade com respeito ao espectro de onda de entrada.
- O índice m indica a ordem de não-linearidade com respeito ao parâmetro β de *velocity bunching*;
- ξ^2 é a média dos quadrados dos deslocamentos azimutais de um elemento refletido.

3.1.1 Superfície estática

Seguindo nas definições propostas no método direto, destaca-se a contribuição específica da superfície estática sob a forma de funções de modulação:

$$T_{\vec{k}}^R = T_{\vec{k}}^t + T_{\vec{k}}^h + T_{\vec{k}}^{rb} \quad (3.2)$$

Onde:

- $T_{\vec{k}}^R$ é a função de modulação RAR (associada à superfície estática);
- $T_{\vec{k}}^t$ é a função de modulação de inclinação ou *tilt*;
- $T_{\vec{k}}^h$ é a função de modulação de hidrodinâmica.
- $T_{\vec{k}}^{rb}$ é a função de modulação de *range bunching*. Esta função, embora não conste em [9], está presente no código fonte (FORTRAN) do WASAR-MPI.

Com $T_{\vec{k}}^t$ expressa por:

$$T_{\vec{k}}^t = 4ik_l \cot(\theta)(1 + \sin^2(\theta))^{-1} \quad (3.3)$$

Onde k_l representa a componente do vetor número de onda na direção de visada do radar e θ é o ângulo de incidência do sinal.

T_k^h expressa por:

$$T_k^h = \frac{\omega - i\mu}{\omega^2 + \mu^2} (4.5) |\vec{k}| \omega \left(\frac{k_y^2}{|\vec{k}|^2} + Y_r + iY_i \right) \quad (3.4)$$

Onde μ é um termo de relaxamento introduzido para descrever a reação das ondas curtas por conta da modulação das ondas longas e $Y_r + iY_i$ é um termo adicional que representa a modulação das ondas longas a partir da ação dos ventos nas ondas curtas.

T_k^{rb} expressa por:

$$T_k^{rb} = \frac{i|k|}{\tan(\theta)} \quad (3.5)$$

Onde θ é o ângulo de incidência.

Esta função de modulação se deve à variação na área iluminada pelo SAR devido às diferenças no ângulo de incidência ao longo do campo de ondas longas. Esta variação modula a intensidade do sinal retroespalhado por unidade de área.

3.1.2 Efeitos do movimento

Completando a análise do método direto, deve-se considerar a modificação da imagem estática induzida pelos movimentos da superfície. Basicamente, dois efeitos devem ser destacados: O deslocamento azimutal ξ da posição aparente de um elemento representado no plano da imagem e a distorção Δx da imagem do elemento detectado.

De acordo com a teoria de imageamento SAR, o deslocamento azimutal ξ do elemento detectado é proporcional à componente ν de sua velocidade orbital na direção de *range*. Abaixo seguem as relações cabíveis:

$$\xi = \beta \nu \quad (3.6)$$

$$\beta = \frac{\rho}{U} \quad (3.7)$$

Onde:

- ρ é a distância do sensor ao elemento detectado;

- U é a velocidade da plataforma.

A velocidade orbital ν é definida como a velocidade média durante o período em que o elemento é iluminado pelo SAR. Normalmente, este tempo é pequeno em relação ao período da onda, então ν pode ser definido pela velocidade orbital instantânea no centro da janela de visada.

O termo Δx , relacionado à distorções na imagem, é normalmente representado como a soma de um termo de aceleração de segunda ordem com o termo de espalhamento da velocidade. Porém, tal termo não é utilizado no algoritmo WASAR por não ter um papel significativo em relação aos objetivos buscados.

Desta forma, deve-se considerar a contribuição dos efeitos do movimento através da função de modulação de *velocity bunching*:

$$T_{\vec{k}}^{vb} = -\beta k_x \omega \left(\cos(\theta) - i \sin(\theta) \frac{k_l}{|\vec{k}|} \right) \quad (3.8)$$

Com isso, é possível descrever todas as contribuições com um parâmetro único, a função de modulação SAR, que inclui a abordagem estática e os efeitos do movimento:

$$T_{\vec{k}}^{SAR} = T_{\vec{k}}^R + T_{\vec{k}}^{vb} \quad (3.9)$$

Desta forma, as principais relações que descrevem o método direto implementado no WASAR foram apresentadas, ainda que tenham sido omitidas passagens matemáticas importantes.

3.2 Método inverso

Não há como elaborar uma inversão formal única a partir do método direto por conta da questão da ambiguidade direcional e da perda de informação por conta do *cutoff* azimutal. O procedimento padrão para resolver este tipo de problema é introduzir um termo de regularização que usa informação adicional, neste caso o espectro de onda $\hat{F}(\vec{k})$ usualmente gerado a partir de um modelo de geração e propagação de ondas (este espectro de onda usado como informação adicional é denominado *first guess*).

Seguindo esta abordagem, define-se o espectro de onda de ajuste otimizado $F(\vec{k})$ como o espectro que minimiza a função de custo:

$$J = \int [P(\vec{k}) - \hat{P}(\vec{k})]^2 d\vec{k} + \mu \int \left[\frac{[F(\vec{k}) - \hat{F}(\vec{k})]}{[B + \hat{F}(\vec{k})]} \right]^2 d\vec{k} \quad (3.10)$$

Onde $\hat{P}(\vec{k})$ e $P(\vec{k})$ são os espectros da imagem SAR observado e ajustado (gerado a partir do método direto), respectivamente, μ é um termo que relaciona o ajuste do *first guess* ao espectro da imagem SAR observado e B é uma pequena constante positiva para ajustar o denominador do segundo termo de J de forma a permitir que $\hat{F}(\vec{k})$ admita valores nulos.

De forma a melhorar o ajuste do espectro da imagem SAR calculado ao observado sobretudo na vizinhança dos picos do espectro, considera-se ainda a função de custo alternativa (com um fator $\hat{P}(\vec{k})$ adicional no primeiro termo):

$$J' = \int [P(\vec{k}) - \hat{P}(\vec{k})]^2 \hat{P}(\vec{k}) d\vec{k} + \mu \int \left[\frac{[F(\vec{k}) - \hat{F}(\vec{k})]}{[B + \hat{F}(\vec{k})]} \right]^2 d\vec{k} \quad (3.11)$$

Nesta etapa, utiliza-se um método iterativo para tratar desta minimização que resulta na determinação de um espectro de onda a partir de um espectro de imagem SAR.

Deve-se destacar que a inversão determina um espectro de onda com informações da imagem SAR válidas na região de número de onda $|k_x| < k_x^{cutoff}$. No restante do espectro, permanece a influência do *first guess*. E, ainda que consistente em relação ao processo de minimização, o espectro de onda calculado apresenta deslocamentos na região de *cutoff* azimutal.

3.3 A implementação do WASAR

Esta seção trata objetivamente da implementação do WASAR apresentando seu macrofluxo (figura Figura 33) e particularidades de maior destaque.

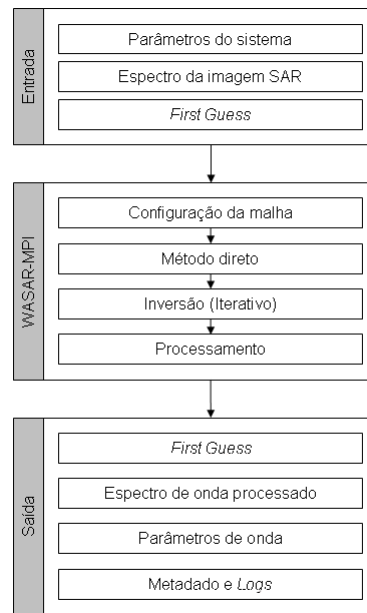


Figura 33 : Apresentação simplificada do macrofluxo do pacote WASAR-MPI.

O grupo definido como 'Entrada' é composto basicamente por três entidades:

- Parâmetros do sistema - Composto por parâmetros gerais da simulação e do satélite tais como a diferença temporal entre o espectro da imagem SAR e o *first guess*, informação sobre a polarização do satélite, ângulo de incidência, etc;
- Espectro da imagem SAR - Trata-se do espectro da imagem SAR propriamente dito. Dependendo do satélite, algumas adaptações podem ser necessárias para a correta leitura desses dados (figura Figura 34);
- *First Guess* - Trata-se do espectro direcional de ondas complementar. Em geral, oriundo de modelo de propagação de ondas (figura Figura 35).

O grupo definido como 'WASAR-MPI' é composto basicamente por quatro entidades:

- Configuração da malha - Nesta etapa, alguns dos parâmetros de entrada são utilizados de forma que o algoritmo seja capaz de lidar com os espectros adequadamente;
- Método direto - Nesta etapa, o método direto é realizado. Ou seja, um espectro de imagem SAR é gerado a partir do *first guess*;

- Inversão - Nesta etapa, o processo de inversão é realizado através de método iterativo;
- Processamento - Nesta etapa, os resultados do método direto e inversão são analisados e as informações de saída são processadas.

O grupo definido como 'Saída' é composto basicamente por quatro entidades:

- *First Guess* - Espectro direcional de onda complementar original;
- Espectro de onda processado - Espectro direcional de onda obtido após a etapa de processamento do WASAR;
- Parâmetros de onda - Alguns parâmetros de onda (como altura significativa, período de pico, etc.) são fornecidos sob a forma de tabelas;
- Metadado e *Logs* - São arquivos de texto que apresentam informações importantes para a interpretação dos dados bem como para permitir o acompanhamento de cada passo do programa.

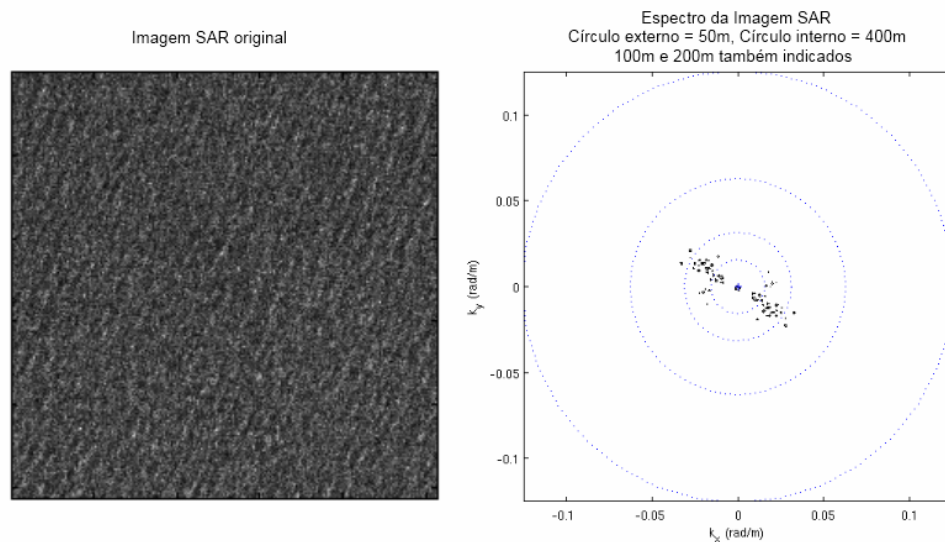


Figura 34 : Exemplo de uma imagem SAR e seu espectro da imagem associado.

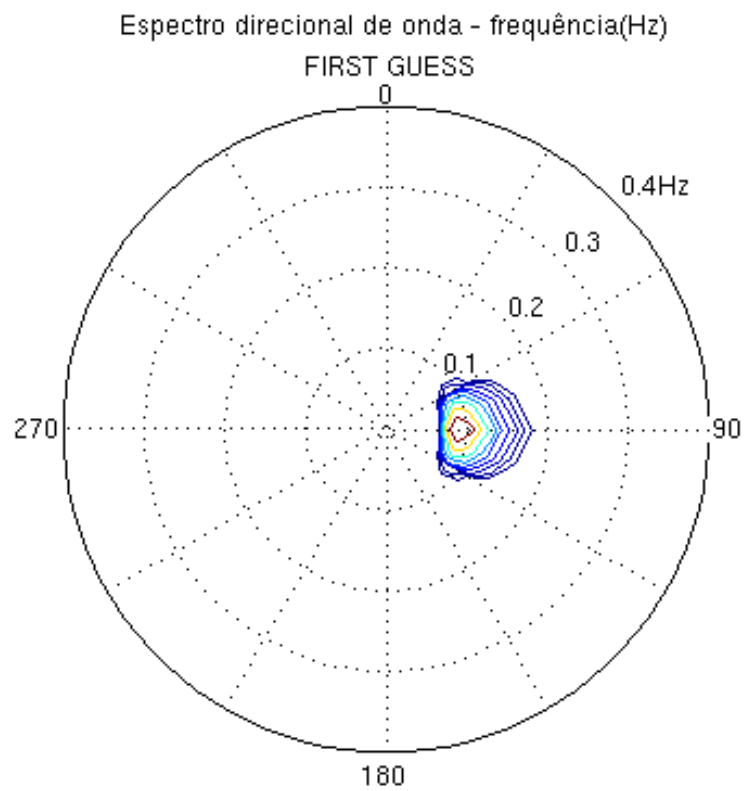


Figura 35 : Representação polar o espectro direcional de onda utilizado como *first guess*.

Este capítulo foi baseado principalmente nas seguintes referências: [23], [9] e [24]. Suas citações foram mantidas no formato do texto original.

4 SIMULADOR DE IMAGENS SAR - SSSWS

A simulação de imagens SAR torna mais simples a avaliação do desempenho de algoritmos para extração do espectro direcional de ondas destas imagens. Partindo-se de um caso idealizado, como por exemplo ondas regulares se propagando na direção de *range*, a imagem SAR correspondente a este estado de mar é simulada em função das MTFs discutidas na seção 2.4.1. Desta forma, o emprego de imagens SAR sintéticas, representando estados de mar relativamente simples e bem definidos, apresenta-se como uma ferramenta eficaz para a determinação de possíveis erros ou limitações da técnica empregada, além de facilitar a compreensão dos mecanismos e procedimentos de imageamento do SAR.

Existem basicamente duas formulações para simuladores SAR: Superfície distribuída (DS, da sigla em inglês) e *velocity bunching* (VB, da sigla em inglês). A primeira, se baseia na leitura dos padrões das ondas da superfície do oceano enquanto a segunda mantém seu foco no retroespalhamento das partículas iluminadas.

O simulador escolhido para este trabalho foi o SSSWS (*SAR Sea Surface Waves Simulator*), [8], que foi desenvolvido em MATLAB e está disponível para uso científico/educacional. Seu desenvolvimento com abordagem acadêmica/educacional, sua implementação/disponibilização em MATLAB e sua interface amigável foram pontos decisivos em sua utilização.

4.1 Teoria elementar

De acordo com a teoria de Bragg, apenas ondas que estão em ressonância com o sinal do radar são detectáveis. Como consequência deste fato, as informações de ondas longas são obtidas indiretamente em virtude dos processos de modulação de amplitude e fase, também denominados Radar de Abertura Real (RAR) e efeitos decorrentes dos movimentos da plataforma e alvo (*velocity bunching* e degradação da resolução azimutal).

O processo RAR pode ser descrito por uma função linear que relaciona o NRCS ao campo de ondas longas. Desta forma, o NRCS $\bar{\sigma}_o$, é dado por:

$$\bar{\sigma}_o(\vec{x}_0) = \sigma_o \left\{ 1 + \sum_{m=1}^M |R^{RAR}(\vec{K}_m)| z(\vec{K}_m) \cos(\vec{K}_m \vec{x}_0 + \varphi_m - \psi_m) \right\} \quad (4.1)$$

Onde:

- σ_o é o NRCS estimado;
- $|R^{RAR}(\vec{K}_m)|$ é o módulo da modulação RAR;
- ψ_m é a fase da modulação RAR;
- $z()$ é relacionada ao espectro direcional de ondas;
- M é a quantidade de números de onda associados;
- x_0 é a coordenada azimutal no plano do oceano;
- y_0 é a coordenada em *range* no plano do oceano;
- $\vec{x}_0 = (x_0, y_0)$ é o vetor posição no plano do oceano;
- $\vec{K}_m$ é o vetor número de onda da m-ésima onda;

A modulação RAR, em uma abordagem linear, não depende de $z()$ e pode ser decomposta em três termos:

$$R^{RAR}(\vec{K}) = R^t(\vec{K}) + R^h(\vec{K}) + R^r(\vec{K}) \quad (4.2)$$

O primeiro termo de 4.2 representa a modulação de inclinação e é expresso por:

$$R^t(\vec{K}) = \frac{4ik_y \cot(\theta)}{(1 \pm \sin^2(\theta))} \quad (4.3)$$

Onde o sinal é positivo para polarização VV e negativo para HH.

O segundo termo representa a modulação hidrodinâmica e é expresso por:

$$R^h(\vec{K}) = 4.5\omega|\vec{K}|\frac{\omega - i\mu}{\omega^2 + \mu^2} \sin^2(\phi) \quad (4.4)$$

Onde μ é a taxa de relaxamento das ondas de Bragg ($\mu = 0.5s^{-1}$) e ϕ é a inclinação em relação ao eixo azimutal.

O terceiro termo representa a modulação de *range bunching*, descrita em 3.1.1, que é representada por:

$$R^r(\vec{K}) = \frac{i|\vec{K}|}{\tan(\theta)} \quad (4.5)$$

O SSSWS considera dois mecanismos de distorções azimutais: O *velocity bunching*, associado à componente radial da velocidade orbital, e a degradação da resolução azimutal, associada à componente em *range* da aceleração orbital. Tais componentes podem ser representadas pelas equações abaixo.

$$u_r(\vec{x}_0) = \sum_{m=1}^M z(K_m) \omega_m (\sin^2(\theta) \sin^2(\phi_m) + \cos^2(\theta))^{1/2} \sin(K_m \vec{x}_0 + v_m) \quad (4.6)$$

$$a_r(\vec{x}_0) = \sum_{m=1}^M z(K_m) \omega_m^2 (\sin^2(\theta) \sin^2(\phi_m) + \cos^2(\theta))^{1/2} \cos(K_m \vec{x}_0 + v_m) \quad (4.7)$$

Onde v_m depende dos ângulos de incidência locais e de ϕ_m , que é o ângulo entre a m-ésima direção de propagação de onda e a direção de deslocamento da plataforma.

Com a descrição de todos os principais processos responsáveis pela formação das imagens SAR sobre o oceano, pode-se expressar a relação entre a imagem de intensidade SAR $I(\vec{x})$ e $\bar{\sigma}_o(\vec{x}_0)$:

$$I(\vec{x}) = \int \frac{\bar{\sigma}_o(\vec{x}_0)}{\bar{\rho}_a^2(\vec{x}_0)} \delta(y - y_0) \exp \left\{ -\frac{\pi^2}{\bar{\rho}_a^2(\vec{x}_0)} \left[x - x_0 - \frac{R}{V} u_r(\vec{x}_0) \right]^2 \right\} d\vec{x}_0 \quad (4.8)$$

Onde $\vec{x} = (x, y)$ representa o vetor posição no plano da imagem SAR (x sendo a coordenada azimutal e y a de *range*), R é a distância entre a plataforma e o alvo, V é velocidade da plataforma e $\delta()$ é a função delta de Dirac. A degradação da resolução azimutal $\bar{\rho}_a()$ é dada por:

$$\bar{\rho}_a(\vec{x}) = \left\{ \rho_a^2 + \left[\frac{\pi}{2} \frac{TR}{V} a_r(\vec{x}_0) \right]^2 + \frac{\rho_a^2 T^2}{\tau_s^2} \right\}^{1/2} \quad (4.9)$$

Onde T é o tempo de integração do SAR (tempo entre duas varreduras consecutivas), τ_s é o tempo de coerência (tempo mínimo entre varreduras do radar para que efetue a devida distinção dos alvos) e ρ_a é a resolução azimutal estacionária para cada alvo.

Neste simulador, uma formulação geral foi utilizada para representar a equação 4.8:

$$I(\vec{x}) = \frac{\pi^{1/2}}{2} T^2 \rho_a \frac{\bar{\sigma}_o(\vec{x}_0)}{\left| 1 + \frac{R}{V} \frac{\partial}{\partial x_0} u_r(\vec{x}_0) \right|} \quad (4.10)$$

A equação 4.8 corresponde à equação 4.10 quando $u_r()$, $a_r()$, $\bar{\rho}_a()$ e $\bar{\sigma}_o()$ variam pouco dentro da mesma célula de resolução azimutal.

4.2 Funcionamento do SSSWS

Abaixo, seguem os passos básicos efetuados pelo SSSWS:

Passo 1: A simulação inicia a partir de parâmetros definidos pelo usuário para detalhes do sensor, das condições do oceano e do ruído a serem simulados. A figura Figura 36 mostra os formulários específicos presentes na interface gráfica do SSSWS.

Passo 2: Após a definição dos parâmetros, é criado um espectro direcional de onda a partir da formulação do espectro de JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) com espalhamento direcional de forma cossenoidal (figura Figura 37). Este espectro é interessante pois é capaz de representar diferentes estados de mar: totalmente ou parcialmente desenvolvido.

Passo 3: Após a geração do espectro direcional das ondas, é gerada uma realização da superfície do oceano correspondente e adequada à resolução do sistema.

Passo 4: Com a simulação da superfície do oceano, calcula-se a energia retroespalhada.

Passo 5: Calculam-se as MTFs. (cabe ressaltar que o simulador utilizado neste trabalho utiliza MTFs simplificadas em relação às apresentadas pelo algoritmo WASAR)

Passo 6: Gera a imagem SAR sem ruído (figura Figura 38).

Passo 7: Gera a imagem SAR com a inclusão de ruído (figura Figura 39). Em particular, duas fontes de ruído são consideradas: aditiva e multiplicativa. Os ruídos aditivos são oriundos da diversas fontes, sobretudo da excitação térmica dos dispositivos eletrônicos do sistema e radiação radiométrica que incide na antena do radar (o ruído do calor interno é o mais significativo). O ruído multiplicativo (“*speckle*”) está relacionado aos sinais refletidos por diversos “alvos” simultaneamente.

SENSOR PARAMETERS

Sensor features

Frequency (GHz)

5.3

Look angle (degree)

20.355

Flight direction (degree)

8

Platform height (Km)

785

Pulse bandwidth (MHz)

15.5499

Ground track vel. (Km/s)

6.628

Integration time (s)

0.6

Antenna length W (m)

1

Antenna length L (m)

10

Polarization

VV

Standard parameters

☐ ERS1-C

☐ SIR-C L

☐ SIR-C C

Reset

OK

SEA PARAMETERS

Sea parameters

Temperature (°C)

0

Salinity (psu)

0

Wind direction (° vs North)

0

Wind speed (m/s)

0

Spectrum parameters

Number of wavenumbers

1

Number of directions

1

Peak enhan. factor

0

Phillips parameter

0

Spreading factor

0

OK

OPTIONS

Sensor features

Footprint (m)

0

Swath (m)

0

Range resol. (m)

0

Azimuth res. (m)

0

Image features

Pixel range

0

Pixel azimuth

0

Image definitions

Pixel range

0

Pixel azimuth

0

OK

Figura 36 : Interface gráfica do SSSWS detalhando as janelas de dados de entrada.

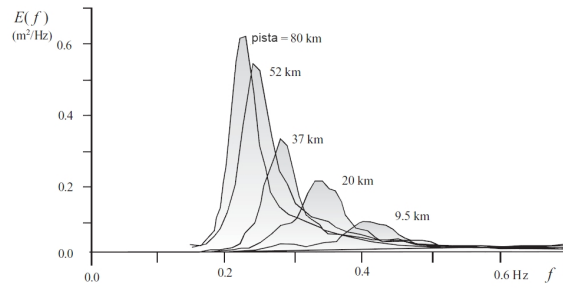


Figura 37 : Representação do espectro observado em JONSWAP a partir de diversas dimensões de pista de ventos. Figura baseada em [1].

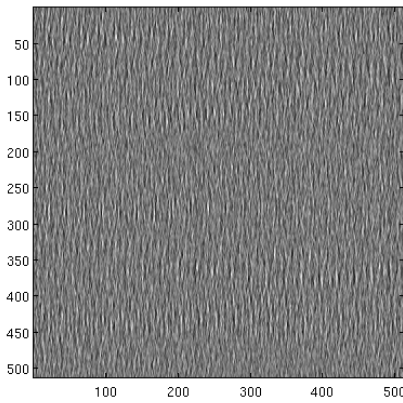


Figura 38 : Exemplo de imagem sem ruído simulada através do SSSWS com ondas se propagando na direção de *range*.

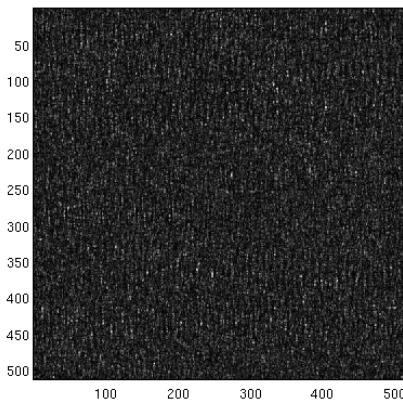


Figura 39 : Exemplo de imagem com ruído simulada através do SSSWS com ondas se propagando na direção de *range*.

5 ACOPLAMENTO DO SIMULADOR SSSWS AO ALGORITMO WASAR-MPI

De posse da versão mais atual do simulador SSSWS, obtida diretamente através de seu autor, foi possível efetuar uma análise e ambientação básica deste pacote. A partir deste contato inicial, foi possível traçar algumas metas específicas para este trabalho.

1. Adaptar a saída do SSSWS às características necessárias para a elaboração do arquivo de entrada do WASAR com o espectro da imagem SAR;
2. Extrair do SSSWS o espectro direcional de ondas para a elaboração do arquivo de entrada do WASAR com o *first guess*;
3. Verificar o acoplamento utilizando o SSSWS em sua formulação original;
4. Verificar o acoplamento inserindo um espectro direcional de onda específico no SSSWS (suprimindo o trecho do pacote que gera esta informação);
5. Verificar o acoplamento inserindo o campo de elevação da superfície do oceano no SSSWS (suprimindo o trecho do pacote que gera esta informação).

Suas particularidades e resultados serão apresentados nas seções 5.1 a 5.5, a seguir.

5.1 Adaptação das características da saída do SSSWS

As propriedades elementares de uma saída do SSSWS estão associadas às características do sensor e da imagem propriamente dita. As características do sensor são a altitude da plataforma, sua velocidade, ângulo de incidência, etc. Enquanto que as características da imagem estão relacionadas à resolução, área iluminada, etc.

No formulário de parâmetros do sensor (figura Figura 40), as seguintes alterações devem ser efetuadas:

- *look angle (degree)* = 19.9
- *Flight direction (degree)* = 193 - De fato, esta alteração não gera nenhuma alteração no funcionamento do SSSWS, que trabalha orientado ao Norte Verdadeiro (0°). Porém, é importante destacá-la pois será uma informação significativa para desenvolvimentos futuros.

- *Ground track vel. (km/s)* = 7.455

Figura 40 : Formulário de entrada dos parâmetros do sensor - SSSWS.

No formulário de opções da imagem (figura Figura 41), as seguintes alterações devem ser efetuadas:

- *Footprint(m)* = 8192
- *Swath(m)* = 10240
- *Range Resol.(m)* = 20
- *Azimuth res. (m)* = 16
- *Image features - Pixel Range* = 512
- *Image features - Pixel azimuth* = 512

Figura 41 : Formulário de entrada dos parâmetros da imagem - SSSWS.

Cabe destacar que nesta etapa foi notado que o SSSWS sobrescrevia os valores inseridos através da interface gráfica. Desta forma, as alterações foram feitas diretamente no código.

A utilização de valores não coerentes com o WASAR poderão gerar problemas/erros significativos.

Com os ajustes acima, as características básicas do SSSWS estão ajustadas e já seria possível gerar o espectro da imagem SAR simulada adequadamente (de forma que seja lido corretamente pelo WASAR).

5.2 Extração do espectro direcional de ondas do SSSWS

Além do espectro da imagem SAR, o WASAR utiliza um espectro direcional de onda como informação adicional. Desta forma, é preciso extrair do SSSWS o espectro direcional de ondas que foi utilizado para gerar a imagem simulada.

Cabe destacar que tal espectro é gerado através das informações fornecidas através do formulário *Sea Parameters*, sendo a maior influência nas características do cenário a ser simulado decorrentes dos dados de direção e intensidade dos ventos.

A partir desses dados, o SSSWS gera um espectro unidimensional (através da formulação JONSWAP) e também o espalhamento direcional (através da formulação $\cos^2\theta$). Com esses dois vetores, é possível gerar o espectro direcional de ondas com as mesmas características de um espectro gerado por um modelo de geração e propagação de ondas. Para isso, alguns ajustes deverão ser realizados, sobretudo nas escalas de direção e frequência/número de onda:

5.2.1 Ajustes no espalhamento direcional

O espalhamento direcional deve ser expresso em um vetor com 24 posições representando as direções de 00 a 345 graus, com saltos de 15 graus. Sendo assim, será preciso interpolar os valores do espalhamento direcional original do SSSWS em relação ao novo vetor proposto (figura Figura 42).

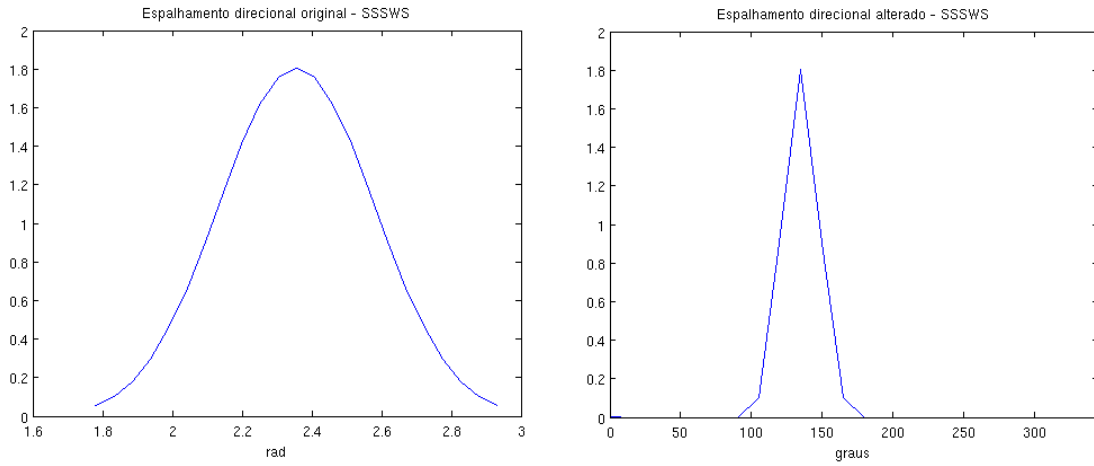


Figura 42 : Ajustes no espalhamento direcional.

5.2.2 Ajustes no espectro unidimensional

O espectro unidimensional deve ser expresso em um vetor de 25 posições representando as frequências correspondentes aos valores abaixo:

$$fwam = \begin{cases} 0.0418; 0.0459; 0.0505; 0.0556; 0.0612; \\ 0.0673; 0.0740; 0.0814; 0.0895; 0.0985; \\ 0.1083; 0.1192; 0.1311; 0.1442; 0.1586; \\ 0.1745; 0.1919; 0.2111; 0.2323; 0.2555; \\ 0.2810; 0.3091; 0.3400; 0.3740; 0.4114 \end{cases} \quad (5.1)$$

Sendo assim, será preciso interpolar os valores do espectro unidimensional original do SSSWS em relação ao novo vetor proposto (figura Figura 43).

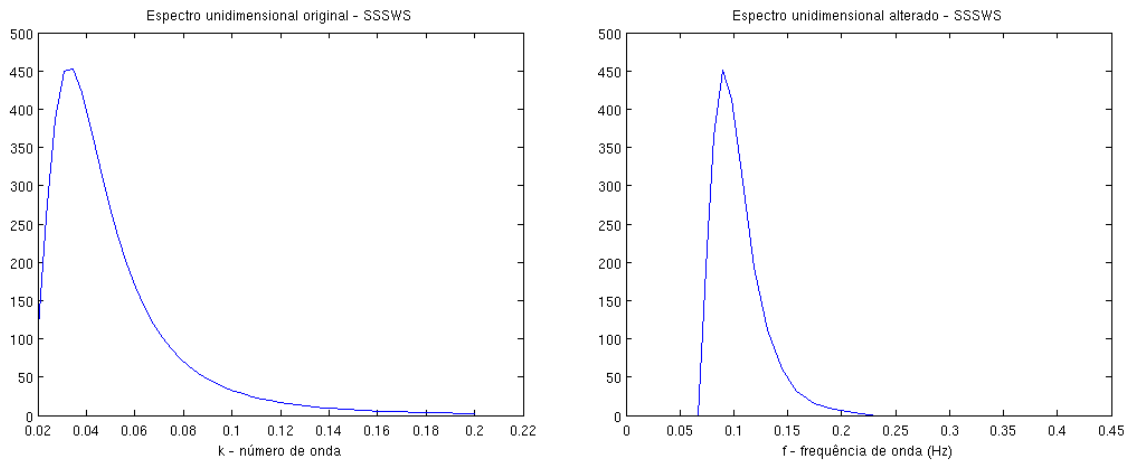


Figura 43 : Ajustes no espalhamento direcional.

Efetuando o produto dos dois vetores ajustados (espectro 1D e espalhamento direcional), obtém-se o espectro direcional das ondas (figura Figura 44).

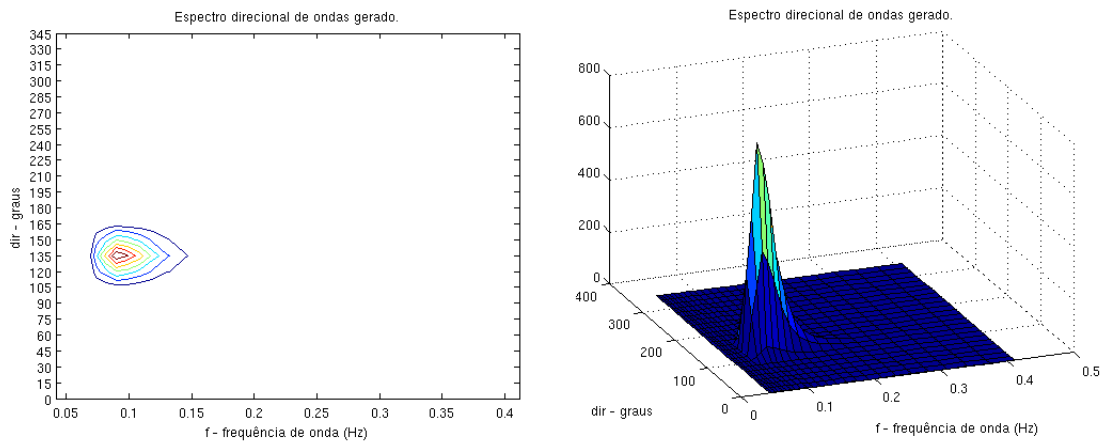


Figura 44 : Formação do espectro direcional a partir dos vetores ajustados.

Com o espectro direcional calculado, basta escrever o arquivo binário com o devido cabeçalho para ser utilizado como *first guess* pelo WASAR.

5.3 Verificação do acoplamento do SSSWS em sua formulação original

Com os devidos ajustes já inseridos no SSSWS, será possível gerar os dados de entrada no formato adequado para inicializar o WASAR. Para isso, basta inserir os dados referentes ao oceano e ao espectro. Em todos os casos foi utilizada a imagem sem ruído

e a direção de propagação da plataforma considerada foi de 0° já que o SSSWS não se ajusta à outros valores. A seguir, segue a apresentação dos casos avaliados.

As simulações 01 a 08 foram elaboradas a partir da formulação original do SSSWS, utilizando os parâmetros de entrada presentes na tabela Tabela 1.

Parâmetro	Valor
Temperatura do oceano ($^\circ\text{C}$)	15
Salinidade do oceano (psu)	0.035
Intensidade do vento (m/s)	15
Quantidade de número de onda do espectro	15
Quantidade de direções do espectro	15
Fator de intensificação do pico (JONSWAP)	1
Parâmetro de Phillips (JONSWAP)	0.0081
Fator de espalhamento	10

Tabela 1 : Parâmetros de entrada no SSSWS - Simulações 01 a 08.

5.3.1 Simulação 01

A Simulação 01 representou um estado de mar com ondas se propagando a 0° . As figuras Figura 45 e Figura 46 mostram os resultados gráficos da simulação.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 2 estejam coerentes, a saída do WASAR se mostrou instável, apresentando como resultado final os próprios dados de entrada.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	204.80	227.56
Direção de pico ($^\circ$)	0.00	0.00
Altura significativa (m)	17.67	-

Tabela 2 : Simulação 01 - Resultados numéricos.

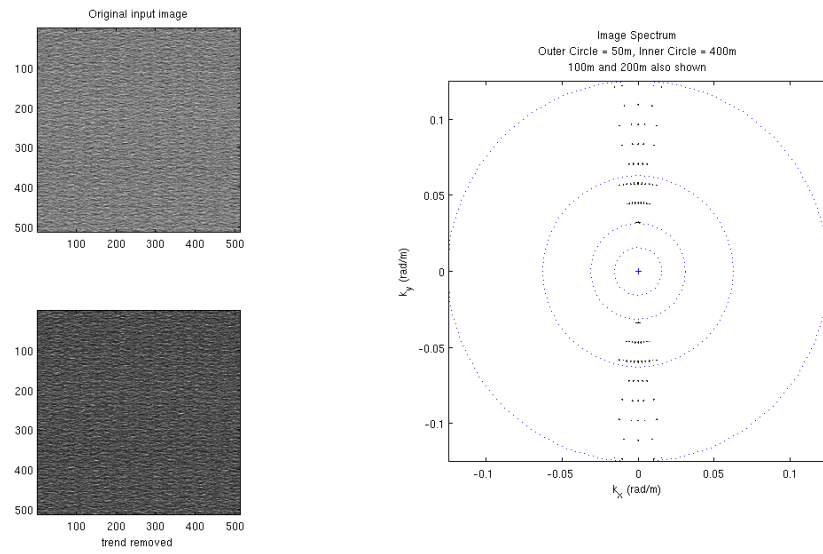


Figura 45 : Simulação 01 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

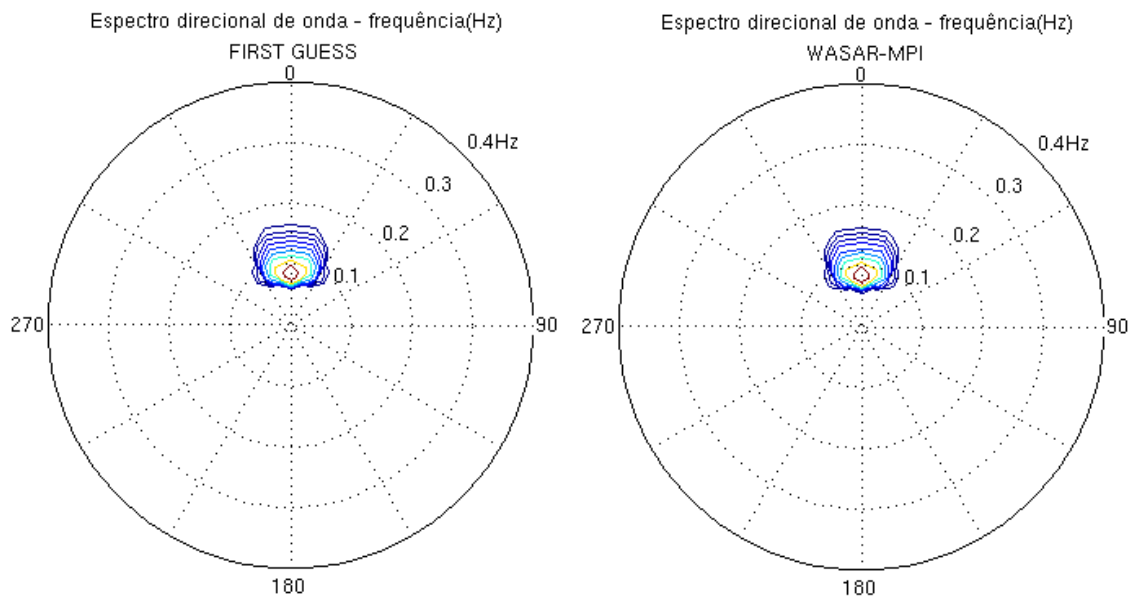


Figura 46 : Simulação 01 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.3.2 Simulação 02

A Simulação 02 representou um estado de mar com ondas se propagando a 45° . As figuras Figura 47 e Figura 48 mostram os resultados gráficos da simulação.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 3 estejam coerentes e o resultado final tenha sido diferente dos dados de entrada, a saída do WASAR se mostrou instável.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	206.88	241.36
Direção de pico (°)	45.00	225.00
Altura significativa (m)	17.68	-

Tabela 3 : Simulação 02 - Resultados numéricos.

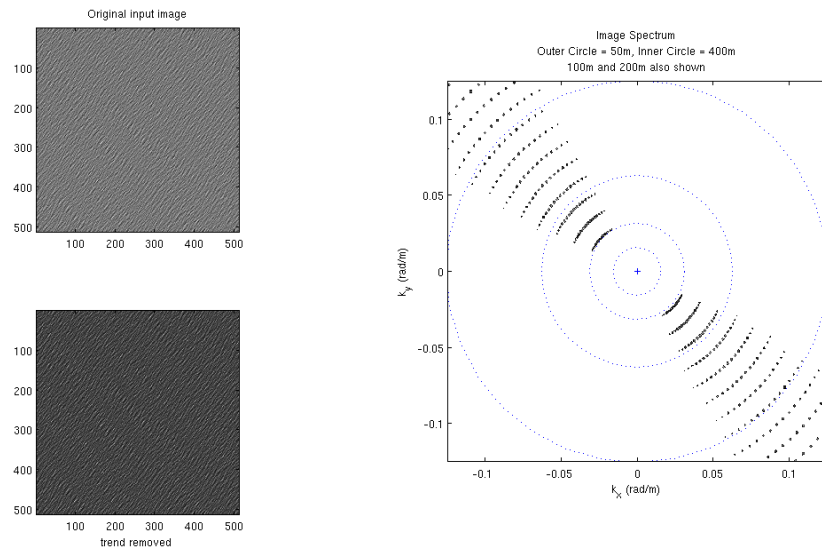


Figura 47 : Simulação 02 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

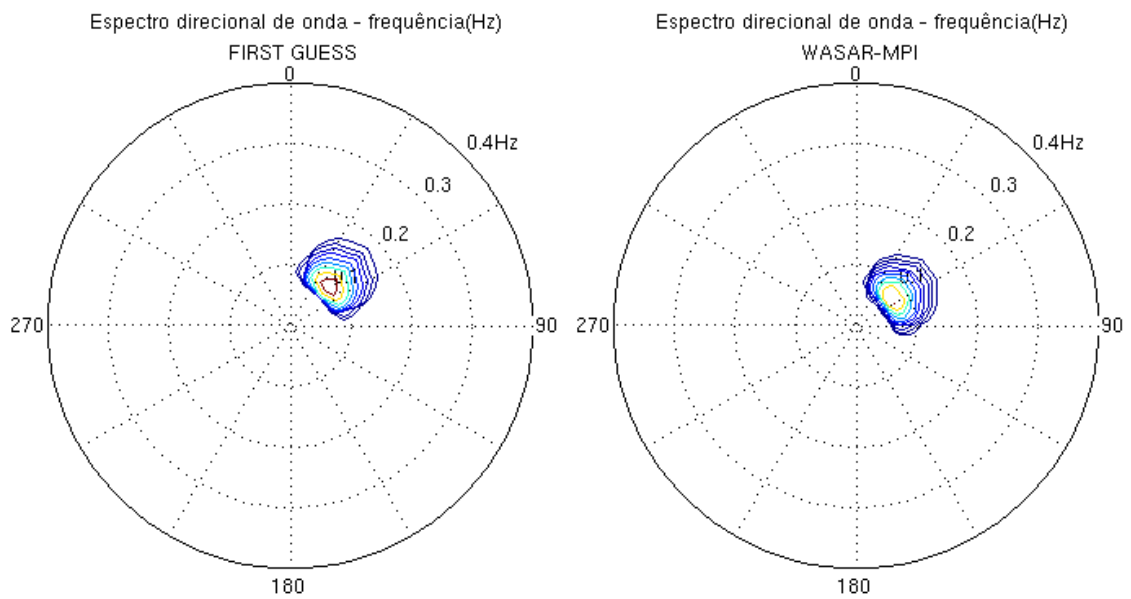


Figura 48 : Simulação 02 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.3.3 Simulação 03

A Simulação 03 representou um estado de mar com ondas se propagando a 90° . As figuras Figura 49 e Figura 50 mostram os resultados gráficos da simulação.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 4 estejam coerentes e o resultado final tenha sido diferente dos dados de entrada, a saída do WASAR se mostrou instável.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	204.80	256.00
Direção de pico ($^\circ$)	90.00	270.00
Altura significativa (m)	17.67	-

Tabela 4 : Simulação 03 - Resultados numéricos.

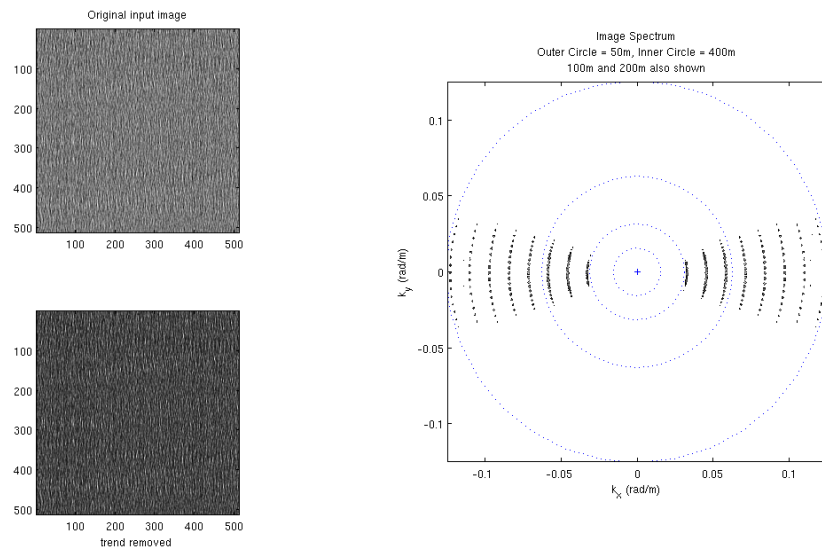


Figura 49 : Simulação 03 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

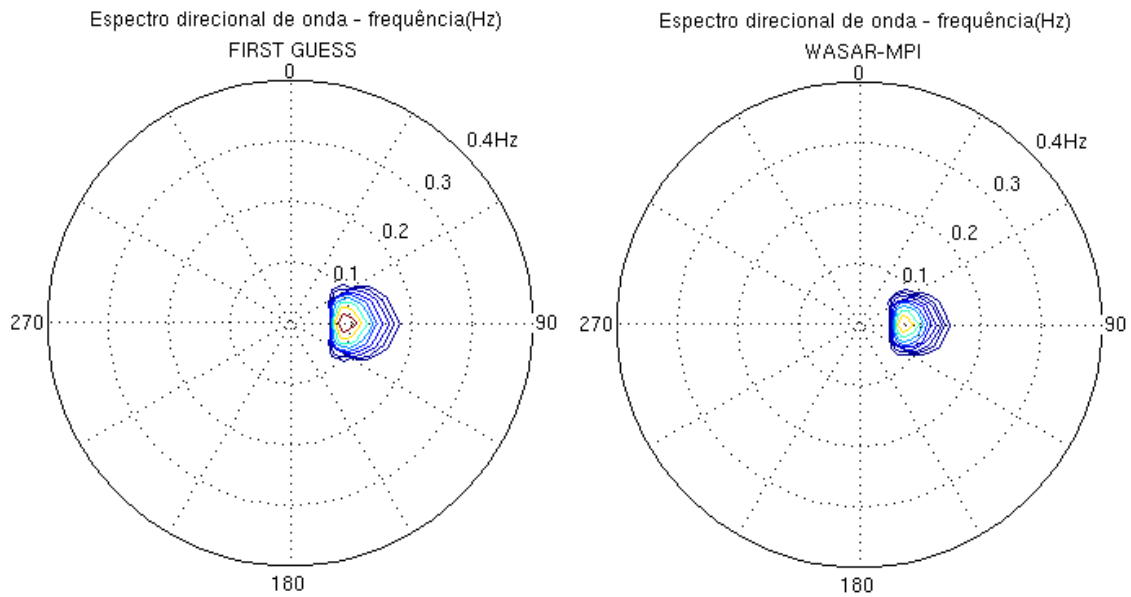


Figura 50 : Simulação 03 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.3.4 Simulação 04

A Simulação 04 representou um estado de mar com ondas se propagando a 135° . As figuras Figura 51 e Figura 52 mostram os resultados gráficos da simulação.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 5 estejam coerentes e o resultado final tenha sido diferente dos dados de entrada, a saída do WASAR se mostrou instável.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	206.88	241.36
Direção de pico ($^\circ$)	135.00	315.00
Altura significativa (m)	17.67	-

Tabela 5 : Simulação 04 - Resultados numéricos.

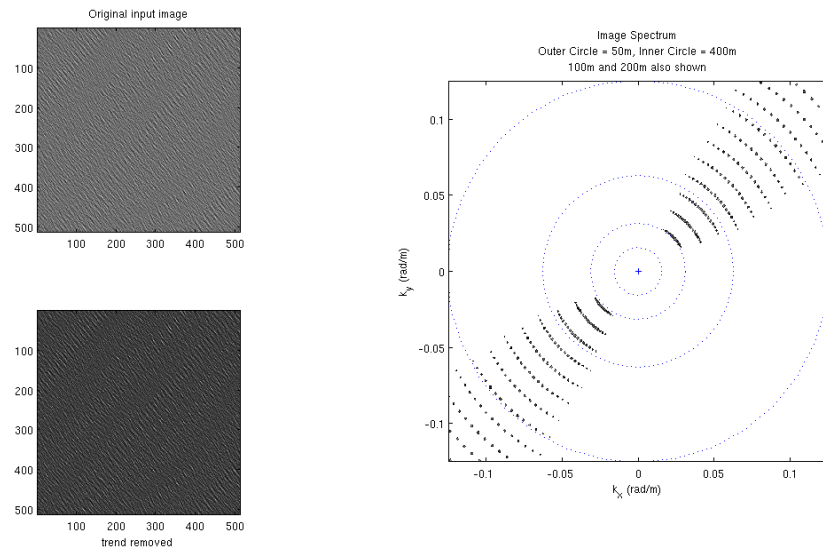


Figura 51 : Simulação 04 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

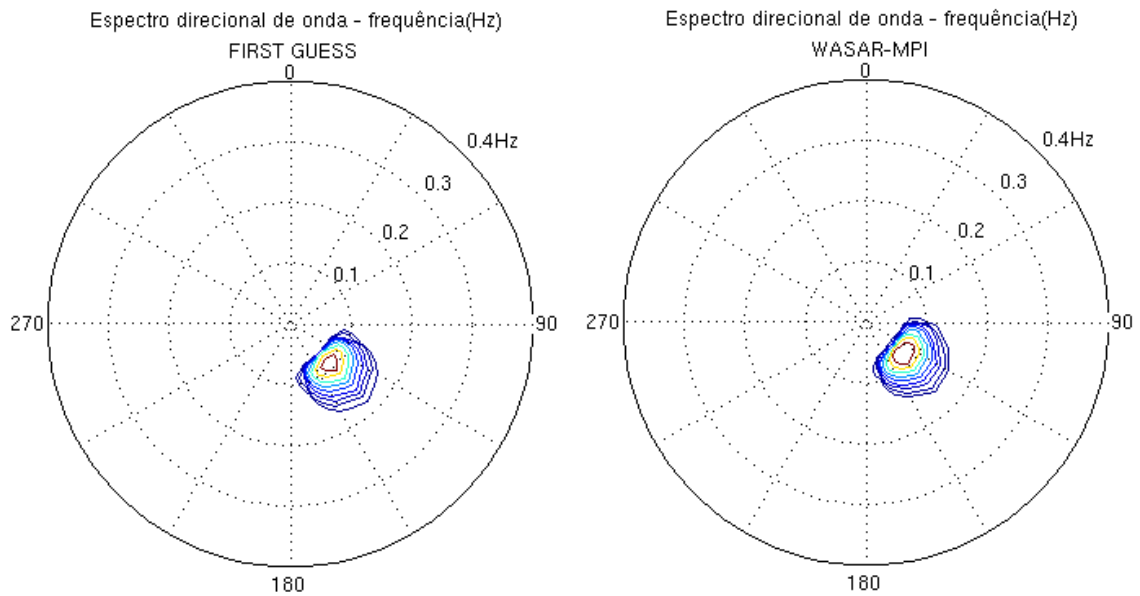


Figura 52 : Simulação 04 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.3.5 Simulação 05

A Simulação 05 representou um estado de mar com ondas se propagando a 180°. As figuras Figura 53 e Figura 54 mostram os resultados gráficos da simulação.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 6 estejam coerentes, a saída do WASAR se mostrou instável, apresentando como resultado final os próprios dados de entrada.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	204.80	227.56
Direção de pico (°)	180.00	0.00
Altura significativa (m)	17.67	-

Tabela 6 : Simulação 05 - Resultados numéricos.

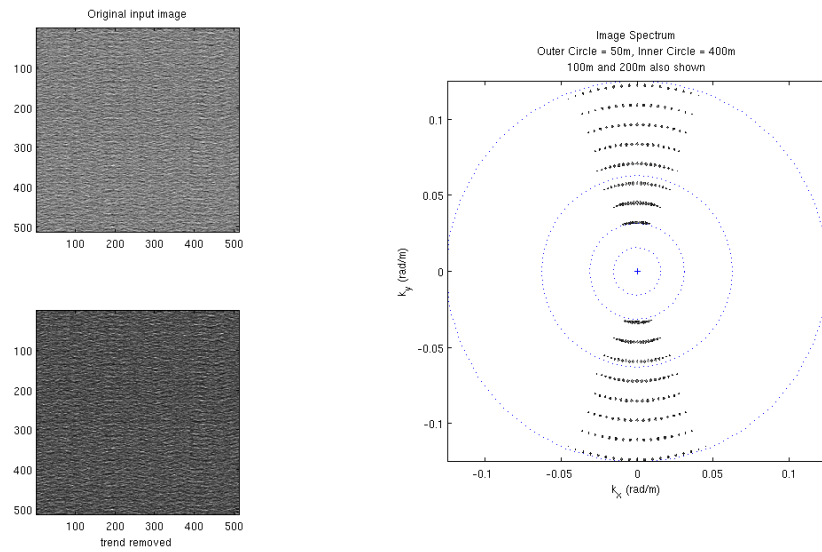


Figura 53 : Simulação 05 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

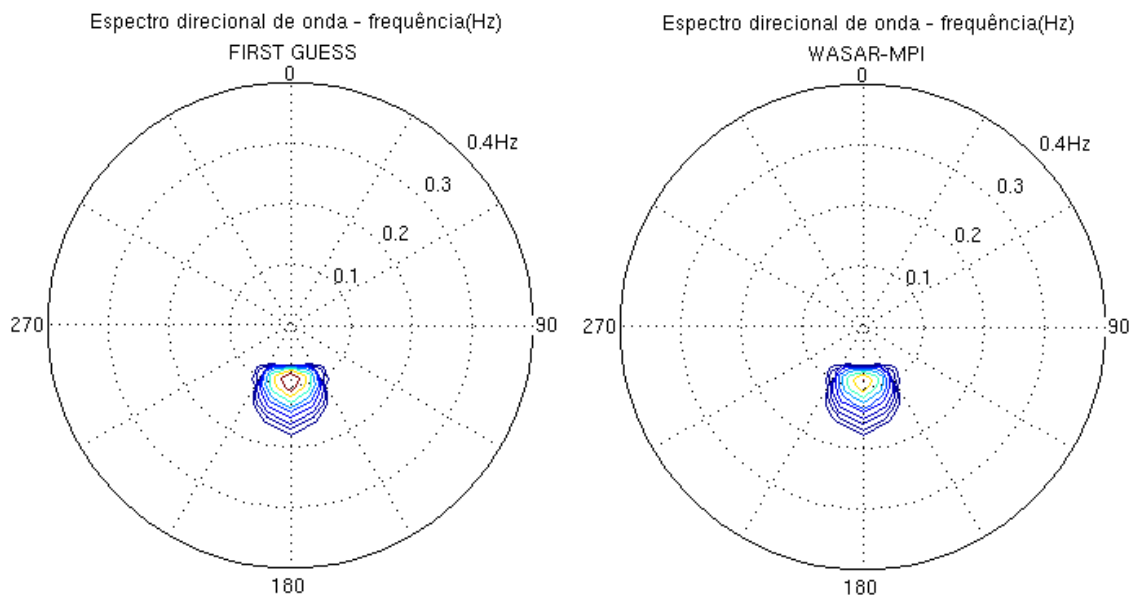


Figura 54 : Simulação 05 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.3.6 Simulação 06

A Simulação 06 representou um estado de mar com ondas se propagando a 225° . As figuras Figura 55 e Figura 56 mostram os resultados gráficos da simulação.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 7 estejam coerentes e o resultado final tenha sido diferente dos dados de entrada, a saída do WASAR se mostrou instável.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	206.88	241.36
Direção de pico ($^\circ$)	225.00	225.00
Altura significativa (m)	17.68	-

Tabela 7 : Simulação 06 - Resultados numéricos.

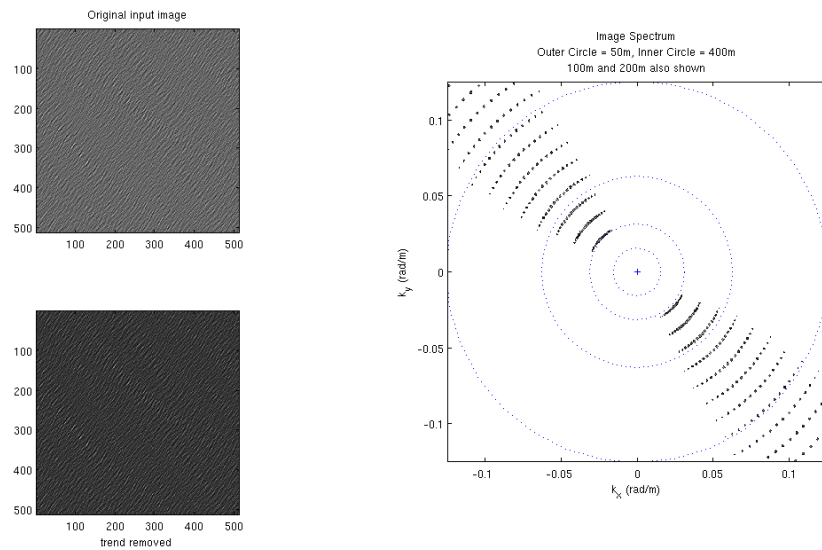


Figura 55 : Simulação 06 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

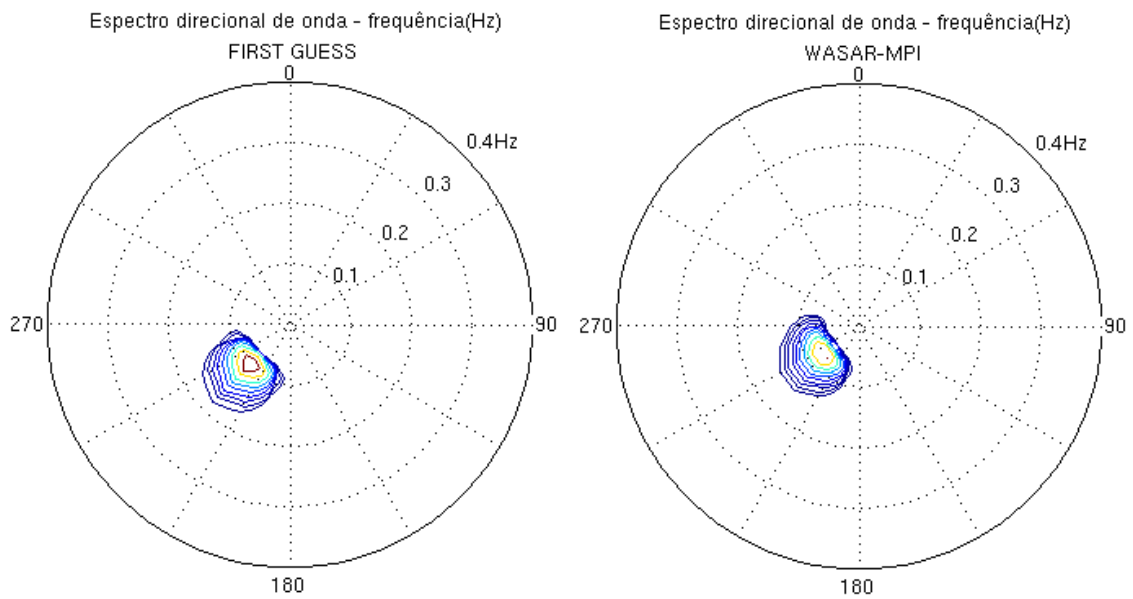


Figura 56 : Simulação 06 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.3.7 Simulação 07

A Simulação 07 representou um estado de mar com ondas se propagando a 270°. As figuras Figura 57 e Figura 58 mostram os resultados gráficos da simulação.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 8 estejam coerentes e o resultado final tenha sido diferente dos dados de entrada, a saída do WASAR se mostrou instável.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	204.80	227.56
Direção de pico (°)	270.00	270.00
Altura significativa (m)	17.67	-

Tabela 8 : Simulação 07 - Resultados numéricos.

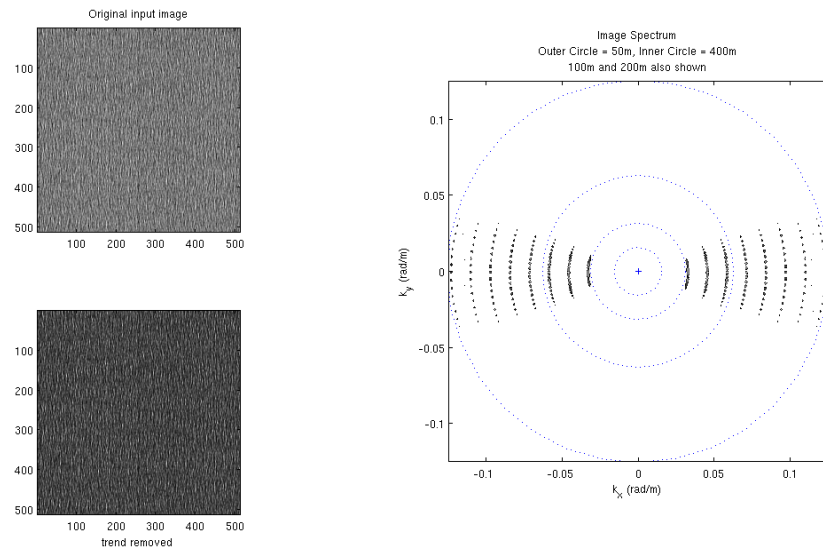


Figura 57 : Simulação 07 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

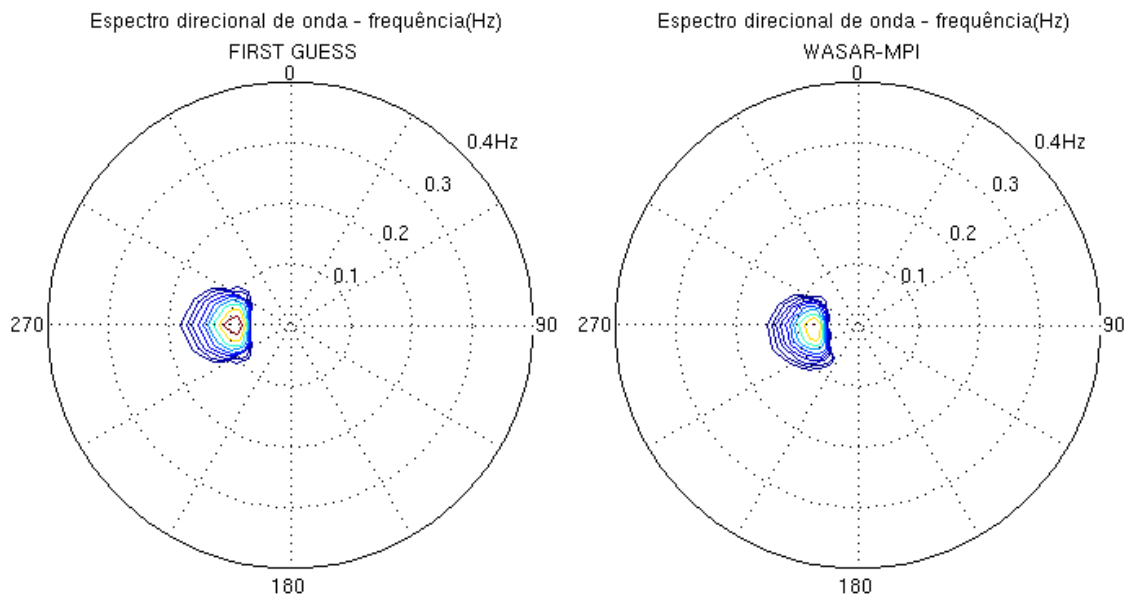


Figura 58 : Simulação 07 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.3.8 Simulação 08

A Simulação 08 representou um estado de mar com ondas se propagando a 315° . As figuras Figura 59 e Figura 60 mostram os resultados gráficos da simulação.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 9 estejam coerentes e o resultado final tenha sido diferente dos dados de entrada, a saída do WASAR se mostrou instável.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	206.88	241.36
Direção de pico (°)	315.00	315.00
Altura significativa (m)	17.68	-

Tabela 9 : Simulação 08 - Resultados numéricos.

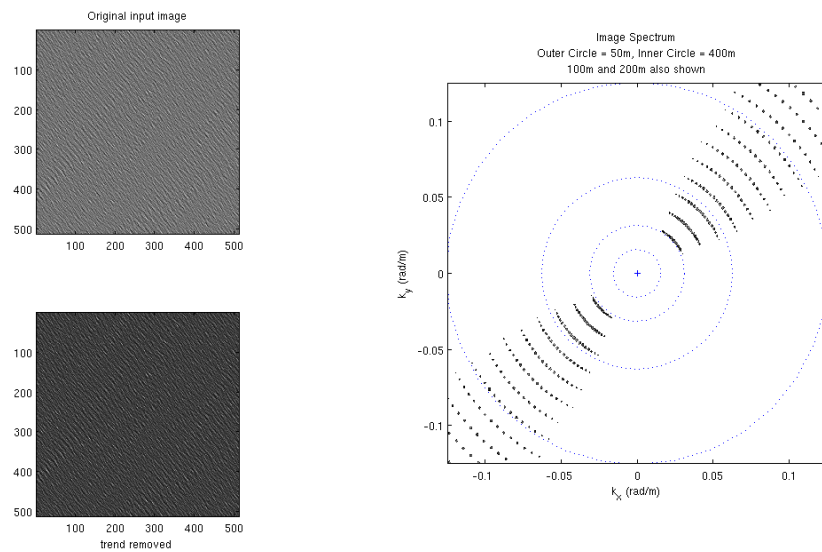
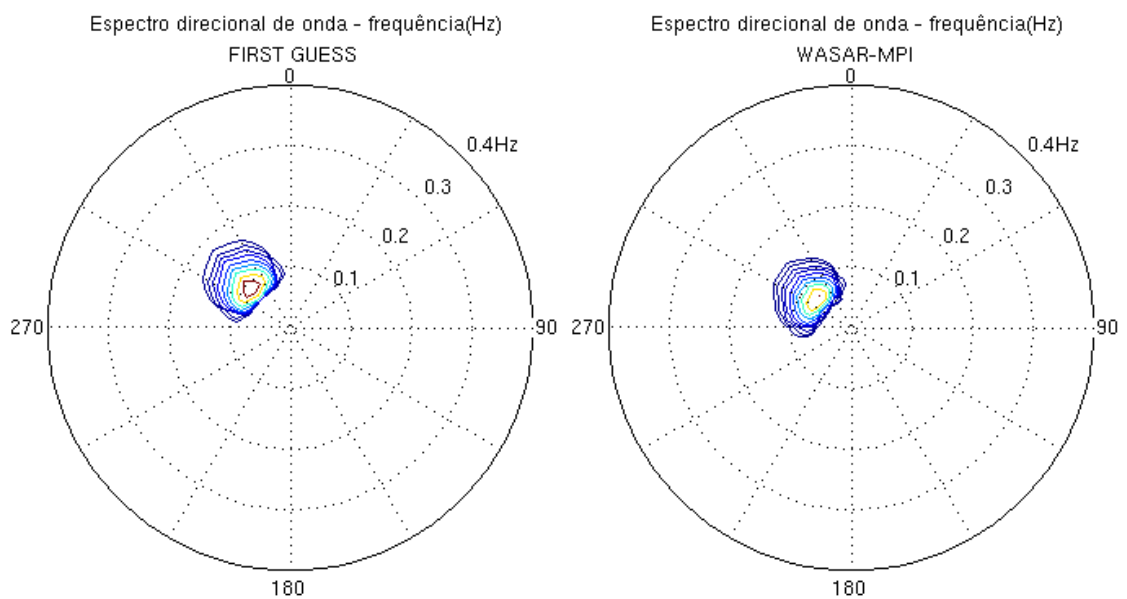


Figura 59 : Simulação 08 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

Figura 60 : Simulação 08 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.4 Verificação do acoplamento do SSSWS com alteração do espectro direcional de onda

As simulações apresentadas a seguir tem por base a modificação do espectro de onda unidimensional e do espalhamento direcional do SSSWS. Ou seja, a simulação não é baseada nos parâmetros de entrada padrão do SSSWS. Abaixo, segue detalhamento de alguns casos simplificados.

5.4.1 Simulação 09

A Simulação 09 representa um estado de mar monocromático com ondas se propagando a 0° . As figuras Figura 61 e Figura 62 mostram os resultados gráficos da simulação e a tabela Tabela 10 apresenta um resumo dos parâmetros mais significativos da simulação. Nela, pode-se comparar os valores de entrada (*first guess*) e os valores obtidos através do WASAR.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 10 estejam coerentes, a saída do WASAR se mostrou instável, apresentando como resultado final os próprios dados de entrada.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	204.80	227.56
Direção de pico ($^\circ$)	0.00	0.00
Altura significativa (m)	7.91	-

Tabela 10 : Simulação 09 - Resultados numéricos.

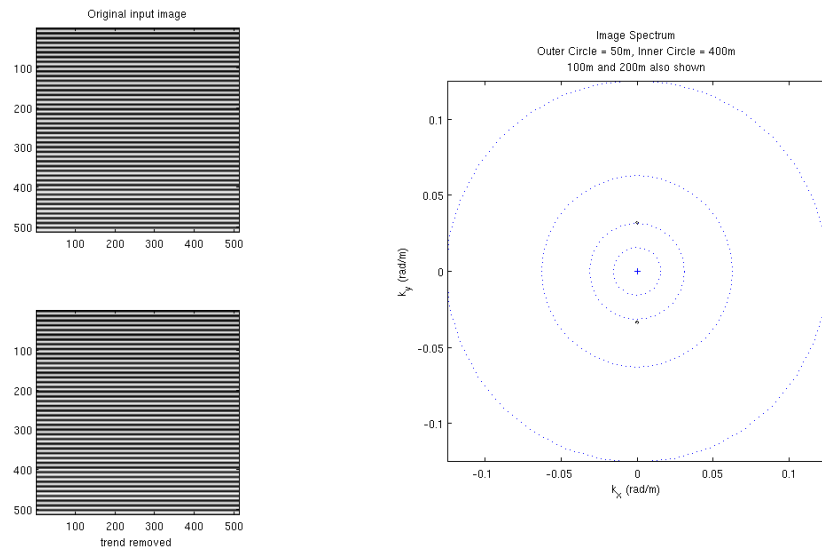


Figura 61 : Simulação 09 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

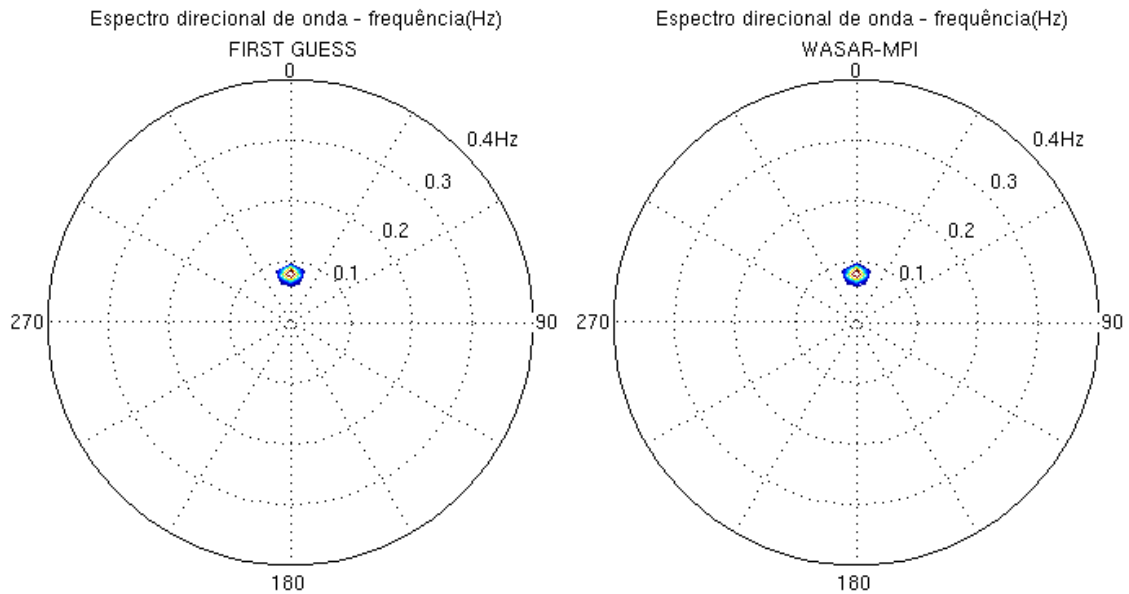


Figura 62 : Simulação 09 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.4.2 Simulação 10

A Simulação 10 representa um estado de mar monocromático com ondas se propagando a 45° . As figuras Figura 63 e Figura 64 mostram os resultados gráficos da simulação e a tabela Tabela 11 apresenta um resumo dos parâmetros mais significativos da simulação. Nela, pode-se comparar os valores de entrada (*first guess*) e os valores obtidos através do WASAR.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 11 estejam coerentes, a saída do WASAR se mostrou instável, apresentando como resultado final os próprios dados de entrada.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	206.88	238.08
Direção de pico ($^{\circ}$)	45.00	215.54
Altura significativa (m)	7.91	-

Tabela 11 : Simulação 10 - Resultados numéricos.

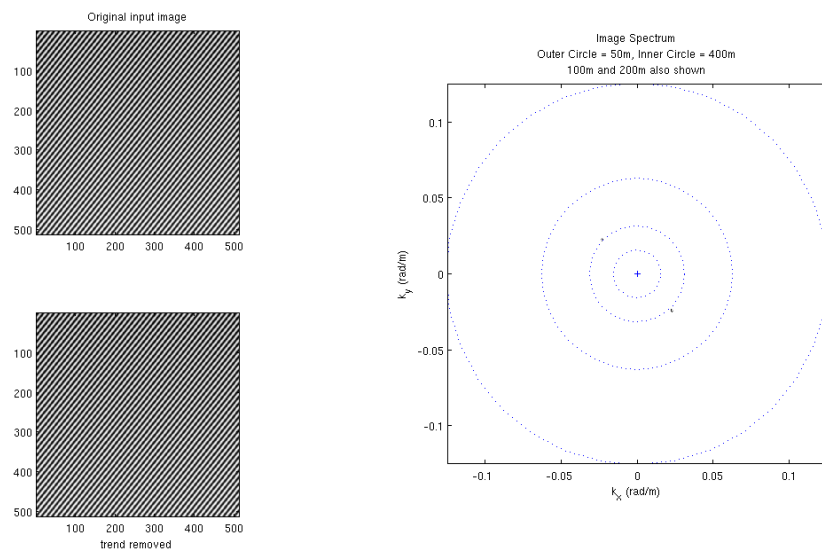


Figura 63 : Simulação 10 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

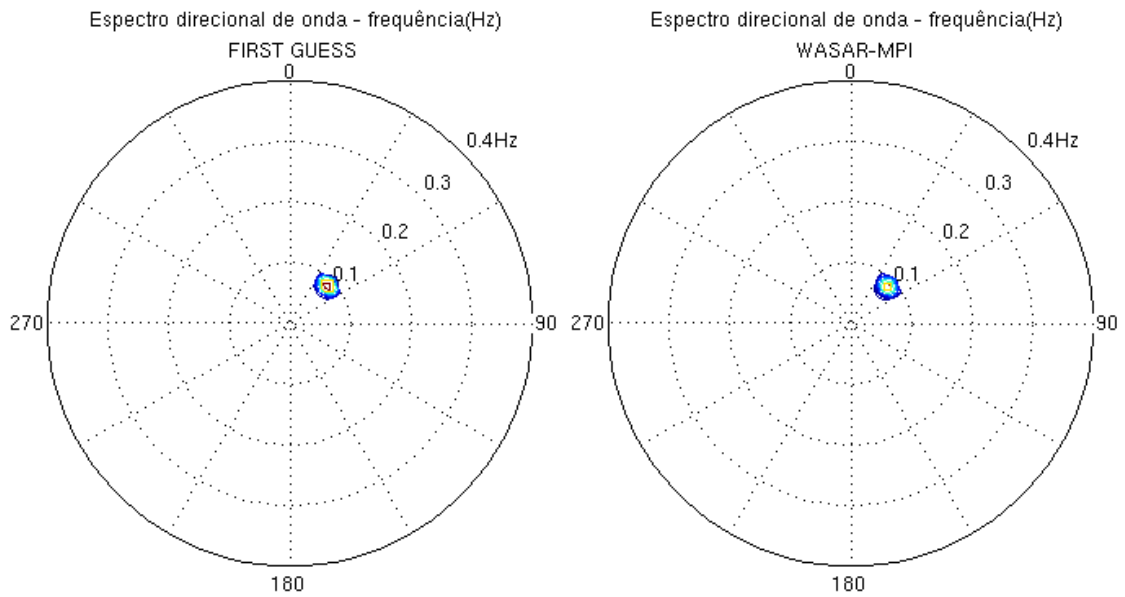


Figura 64 : Simulação 10 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.4.3 Simulação 11

A Simulação 10 representa um estado de mar monocromático com ondas se propagando a 90° . As figuras Figura 65 e Figura 66 mostram os resultados gráficos da simulação e a tabela Tabela 12 apresenta um resumo dos parâmetros mais significativos da simulação. Nela, pode-se comparar os valores de entrada (*first guess*) e os valores obtidos através do WASAR.

Neste caso, a simulação apresentou um resultado aceitável segundo os critérios do WASAR.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	204.80	292.57
Direção de pico ($^\circ$)	90.00	270.00
Altura significativa (m)	7.38	-

Tabela 12 : Simulação 11 - Resultados numéricos.

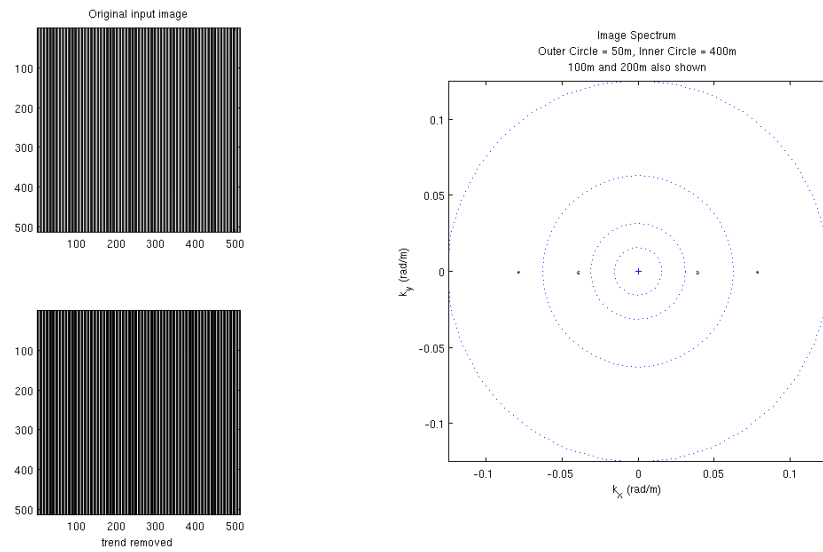


Figura 65 : Simulação 11 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

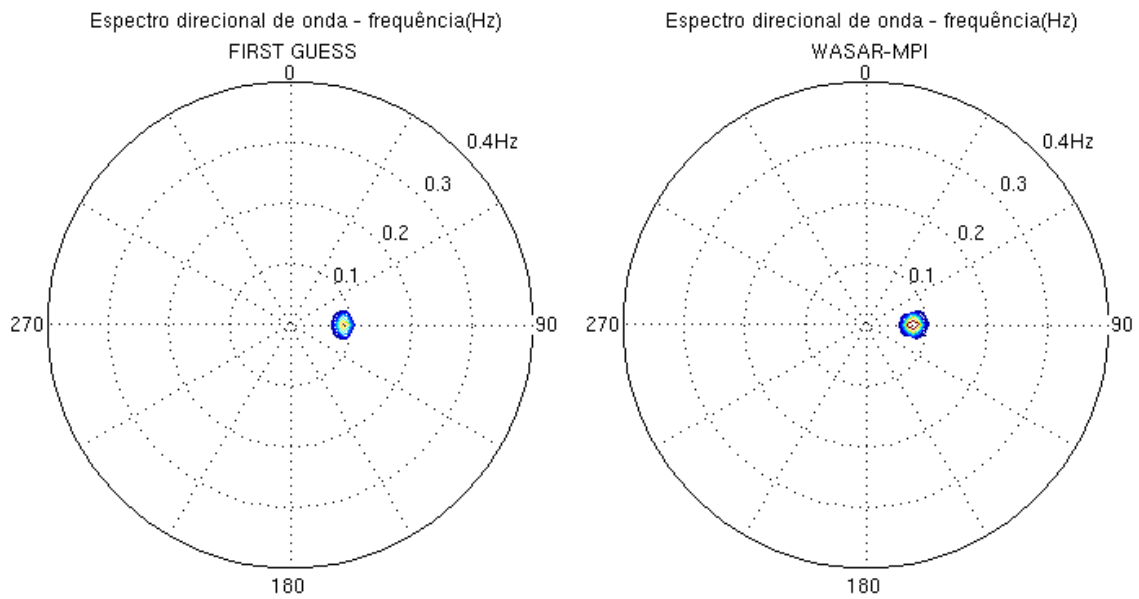


Figura 66 : Simulação 11 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.4.4 Simulação 12

Na simulação 12, o estado de mar simulado é bastante simplificado, apresentando apenas três componentes espectrais e três componentes direcionais (em ambos os casos, as componentes são adjacentes), com ondas se propagando a 90° . As figuras Figura 67 e Figura 68 mostram os resultados gráficos da simulação e a tabela Tabela 13 apresenta

um resumo dos parâmetros mais significativos da simulação. Nela, pode-se comparar os valores de entrada (*first guess*) e os valores obtidos através do WASAR.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 13 estejam coerentes e o resultado final tenha sido diferente dos dados de entrada, a saída do WASAR se mostrou instável.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	204.80	227.56
Direção de pico (°)	90.00	270.00
Altura significativa (m)	8.94	-

Tabela 13 : Simulação 12 - Resultados numéricos.

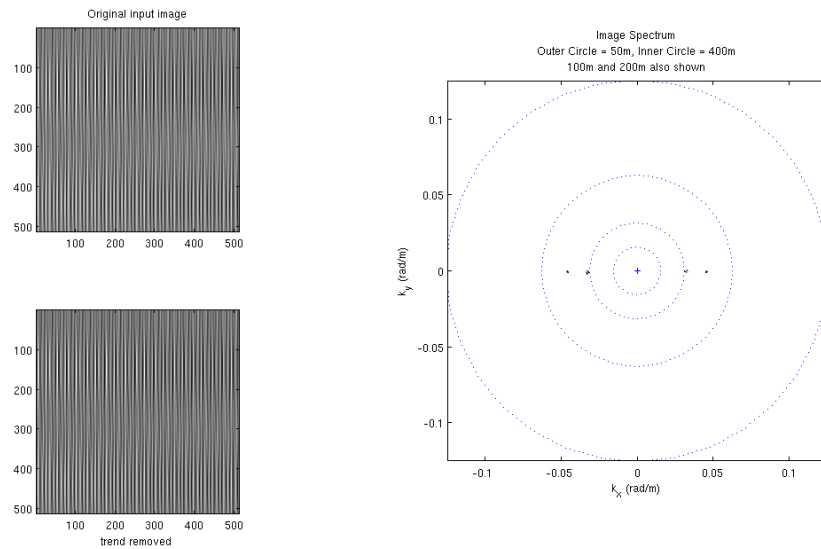


Figura 67 : Simulação 12 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

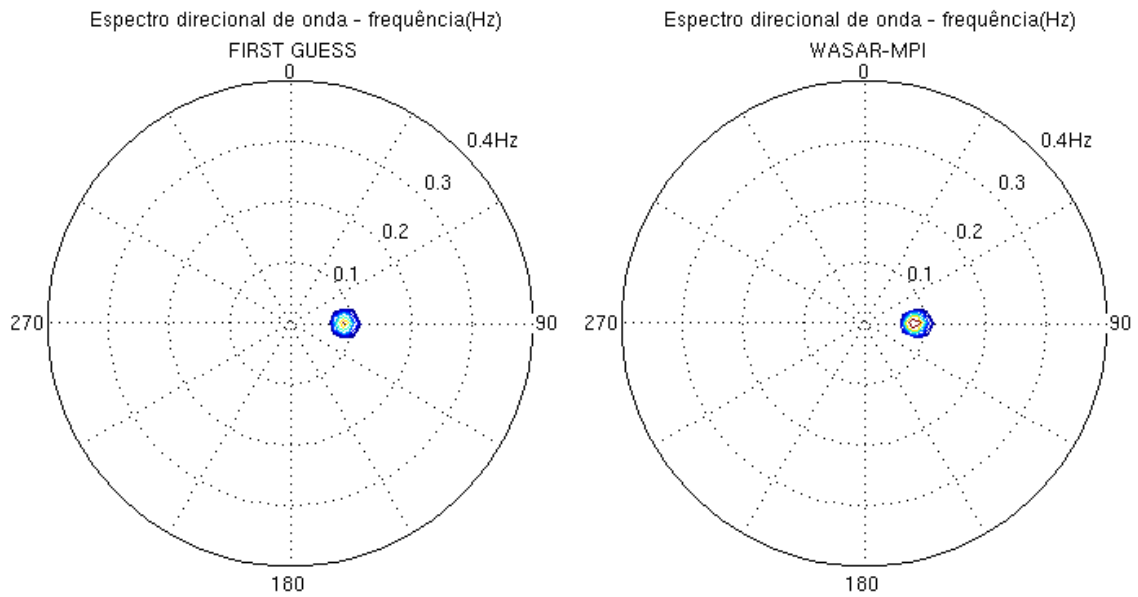


Figura 68 : Simulação 12 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.5 Verificação do acoplamento do SSSWS com alteração do campo de elevação da superfície do oceano

As simulações apresentadas a seguir tem por base a modificação do campo de elevação da superfície do oceano. Ou seja, a simulação não é baseada nos parâmetros de entrada padrão do SSSWS tampouco em sua formulação para cálculo da elevação da superfície. Abaixo, segue detalhamento de alguns casos simplificados.

5.5.1 Simulação 13

A Simulação 13 representa um estado de mar monocromático com ondas se propagando a 0° . As figuras Figura 69 e Figura 70 mostram os resultados gráficos da simulação e a tabela Tabela 14 apresenta um resumo dos parâmetros mais significativos da simulação. Nela, pode-se comparar os valores de entrada (*first guess*) e os valores obtidos através do WASAR.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 14 estejam coerentes e o resultado final tenha sido diferente dos dados de entrada, a saída do WASAR se mostrou instável.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	136.53	227.56
Direção de pico (°)	0.00	0.00
Altura significativa (m)	5.50	-

Tabela 14 : Simulação 13 - Resultados numéricos.

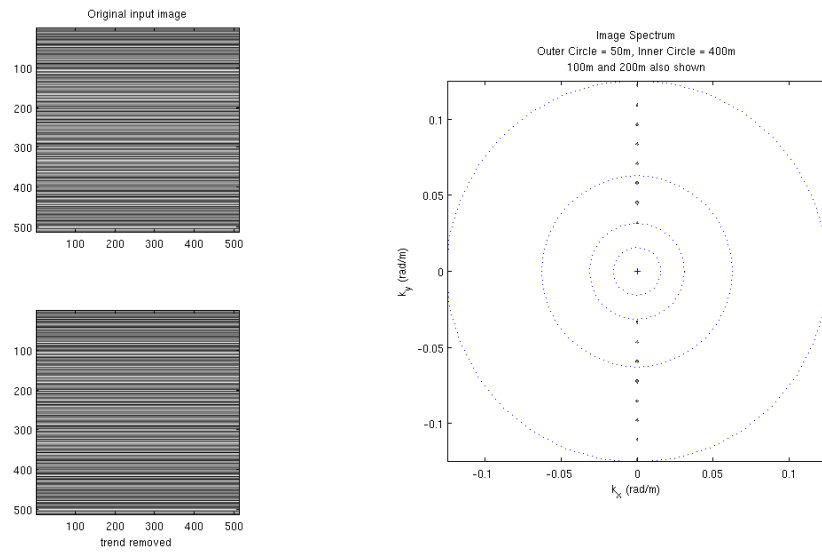
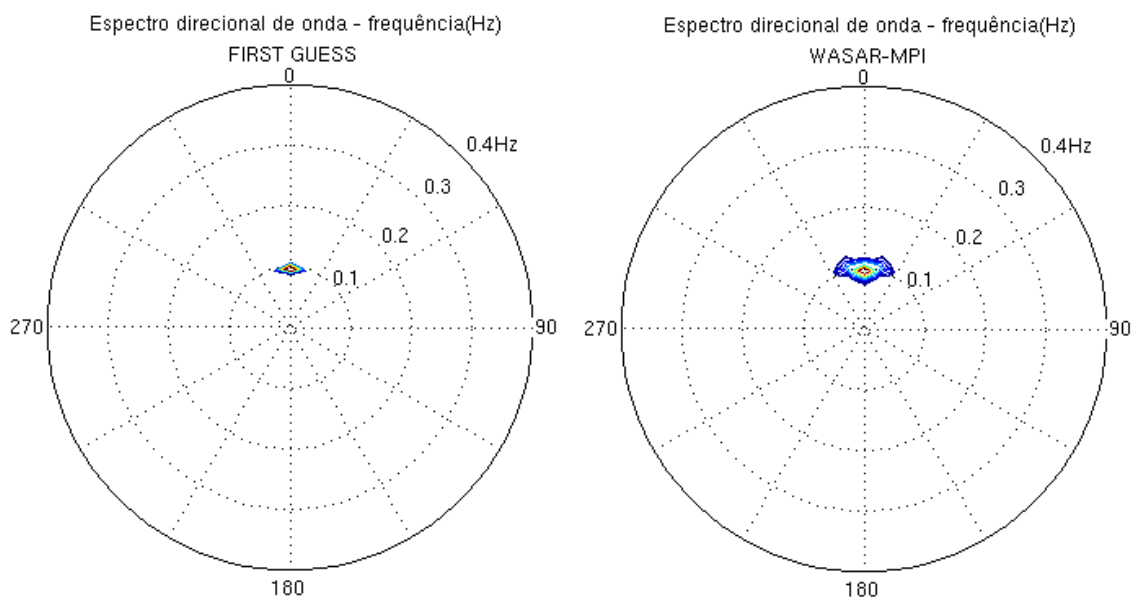


Figura 69 : Simulação 13 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

Figura 70 : Simulação 13 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.5.2 Simulação 14

A Simulação 14 representa um estado de mar monocromático com ondas se propagando a 45° . As figuras Figura 71 e Figura 72 mostram os resultados gráficos da simulação e a tabela Tabela 15 apresenta um resumo dos parâmetros mais significativos da simulação. Nela, pode-se comparar os valores de entrada (*first guess*) e os valores obtidos através do WASAR.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 15 estejam coerentes, a saída do WASAR se mostrou instável, apresentando como resultado final os próprios dados de entrada.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	206.88	238.08
Direção de pico ($^\circ$)	45.00	215.54
Altura significativa (m)	4.95	-

Tabela 15 : Simulação 14 - Resultados numéricos.

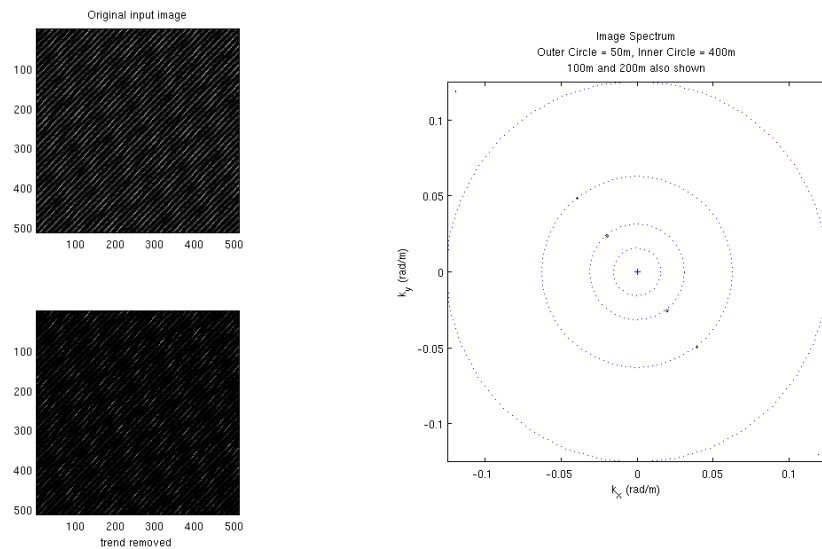


Figura 71 : Simulação 14 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

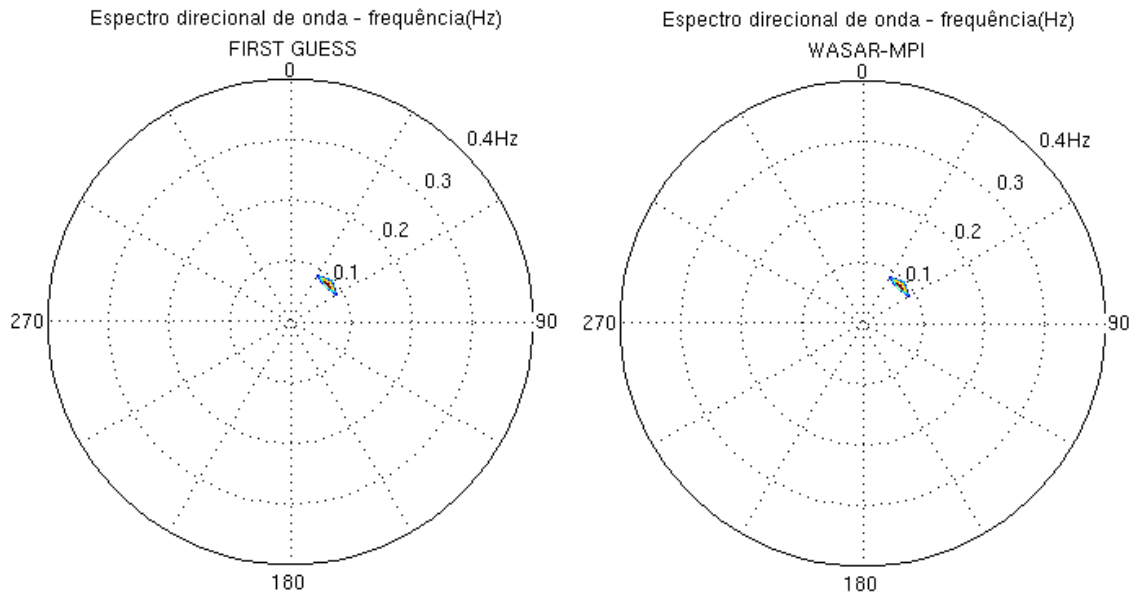


Figura 72 : Simulação 14 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

5.5.3 Simulação 15

A Simulação 15 representa um estado de mar monocromático com ondas se propagando a 90° . As figuras Figura 73 e Figura 74 mostram os resultados gráficos da simulação e a tabela Tabela 16 apresenta um resumo dos parâmetros mais significativos da simulação. Nela, pode-se comparar os valores de entrada (*first guess*) e os valores obtidos através do WASAR.

Neste caso, embora os valores da tabela Tabela 16 estejam coerentes, a simulação apresentou um resultado questionável segundo os critérios do WASAR.

Parâmetro	<i>First Guess</i>	WASAR
Comprimento de pico(m)	157.54	292.57
Direção de pico ($^\circ$)	90.00	270.00
Altura significativa (m)	5.22	-

Tabela 16 : Simulação 15 - Resultados numéricos.

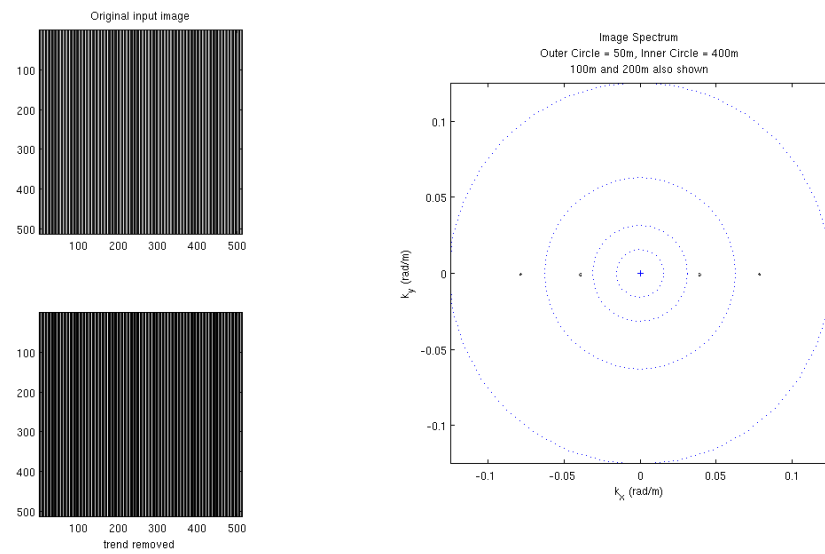


Figura 73 : Simulação 15 - Imagem SAR simulada e seu espectro de imagem correspondente.

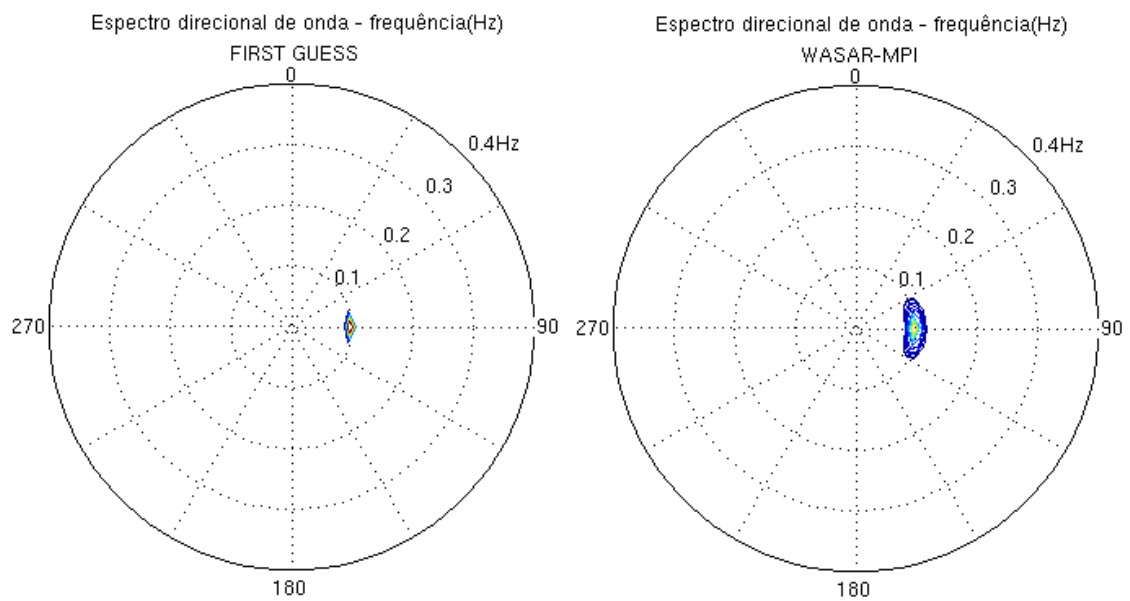


Figura 74 : Simulação 15 - Espectro direcional *first guess* e processado pelo WASAR.

CONCLUSÃO

No capítulo anterior, foram apresentadas as modificações necessárias para a implementação do acoplamento desejado bem como algumas simulações específicas. De certa forma, as próprias simulações em si já são um resultado a ser destacado uma vez que comprovam a coerência das modificações propostas (sobretudo na questão da elaboração dos arquivos de entrada do WASAR-MPI).

Essas simulações foram divididas basicamente em três grupos:

- Simulações 01 a 08: Geradas a partir da formulação original do SSSWS;
- Simulações 09 a 12: Geradas a partir da inclusão forçada de um espectro unidimensional de onda e espalhamento direcional;
- Simulações 13 a 15: Geradas a partir da inclusão forçada do campo de elevação da superfície do oceano.

Em relação ao primeiro grupo de simulações, os seguintes resultados devem ser destacados:

- As direções de propagação das ondas, sobretudo dos picos energéticos, apresentaram coerência em relação aos valores esperados. Na maioria dos casos, a ambiguidade direcional ficou evidente;
- Todas as simulações apresentaram anomalias na direção de propagação das ondas indicadas na representação gráfica de seus espectros da imagem SAR;
- A altura significativa das ondas obtida na leitura do *first guess* pelo WASAR-MPI apresentou valores bastante elevados (cerca de 17m);
- As simulações 01 e 05 apresentaram como resultado final os mesmos dados de entrada. Este fato indica que o algoritmo interpretador encontrou instabilidades significativas nesses casos. Cabe destacar que essas simulações representam ondas se propagando na direção azimutal;
- As simulações 02, 03, 04, 06, 07 e 08, embora tenham apresentado resultados diferentes dos dados de entrada, também apresentaram instabilidades durante os cálculos do WASAR-MPI.

Em relação ao segundo grupo de simulações, os seguintes resultados devem ser destacados:

- As direções de propagação das ondas, sobretudo dos picos energéticos, apresentaram coerência em relação aos valores esperados. Na maioria dos casos, a ambiguidade direcional ficou evidente;
- Todas as simulações apresentaram anomalias na direção de propagação das ondas indicadas na representação gráfica de seus espectros da imagem SAR;
- A altura significativa das ondas obtida na leitura do *first guess* pelo WASAR-MPI apresentou valores consideráveis (variando entre 7 e 8 metros);
- As simulações 09 e 10 apresentaram como resultado final os mesmos dados de entrada. Este fato indica que o algoritmo interpretador encontrou instabilidades significativas nesses casos. Cabe destacar que essas simulações representam ondas senoidais se propagando na direção azimutal e a 45° respectivamente;
- A simulação 12, embora tenha apresentado resultados diferentes dos dados de entrada, também apresentou instabilidades durante os cálculos do WASAR-MPI. Cabe destacar que esta simulação apresentou três componentes espectrais e três componentes direcionais, diferente das demais simulações deste grupo. Ainda assim, não houve melhora expressiva nos resultados;
- A simulação 11 apresentou resultados caracterizados como aceitáveis pelo WASAR-MPI. Esta simulação representou um estado de mar com ondas senoidais se propagando na direção de *range*.

Em relação ao terceiro grupo de simulações, os seguintes resultados devem ser destacados:

- As direções de propagação das ondas, sobretudo dos picos energéticos, apresentaram coerência em relação aos valores esperados. Na maioria dos casos, a ambiguidade direcional ficou evidente;
- Todas as simulações apresentaram anomalias na direção de propagação das ondas indicadas na representação gráfica de seus espectros da imagem SAR;

- A altura significativa das ondas obtida na leitura do *first guess* pelo WASAR-MPI apresentou valores próximos à 5m;
- A simulação 14 apresentou como resultado final os mesmos dados de entrada. Este fato indica que o algoritmo interpretador encontrou instabilidades significativas nesse caso. Cabe destacar que essa simulação representou ondas senoidais se propagando a 45°;
- A simulação 13, embora tenha apresentado resultados diferentes dos dados de entrada, também apresentou instabilidades durante os cálculos do WASAR-MPI;
- A simulação 15 apresentou resultados caracterizados como questionáveis pelo WASAR-MPI. Esta simulação representou um estado de mar com ondas senoidais se propagando na direção de *range*.

De uma forma geral, um bom resultado obtido em todas as simulações foi a coerência na direção de propagação das ondas, sobretudo do pico energético. Em muitos dos casos a ambiguidade direcional ficou evidente.

Todas as simulações apresentaram anomalias na direção de propagação das ondas indicadas na representação gráfica de seus espectros da imagem SAR. Esta questão pode estar associada à orientação de propagação do satélite (ascendente ou descendente) e à direção de visada do radar (esquerda ou direita) configuradas no simulador, no interpretador e nas rotinas auxiliares desenvolvidas para esta atividade.

Nenhum dos três grupos de simulações apresentou resultados que indiquem vantagens no uso do simulador em suas formulações propostas.

As simulações de melhor resultado, 11 e 15 (resultado aceitável e questionável, respectivamente), representaram ondas se propagando da direção de *range*. Esta questão pode estar associada à diferença nas funções de modulação do simulador e do interpretador, sobretudo da modulação de *velocity bunching*.

Das quatro simulações que representaram ondas se propagando na direção azimutal (01, 05, 09 e 13), apenas uma não apresentou como resultado os dados de entrada(13).

Analisando todos os pontos destacados acima, pode-se concluir que o acoplamento do simulador SSSWS ao interpretador WASAR-MPI atendeu parcialmente às expectativas. A questão da direção de propagação das ondas mostrou resultados adequados porém,

a maior parte das simulações apresentou resultados instáveis, independente da formulação de geração das imagens simuladas.

Desta forma, alguns tópicos podem ser apresentados como possíveis desenvolvimentos futuros:

- Verificar detalhadamente a questão da orientação das imagens, sobretudo no simulador e nas rotinas auxiliares;
- Aplicar as funções de modulação usadas pelo interpretador no simulador;
- Verificar detalhadamente a questão das instabilidades obtidas nas simulações;
- Adaptar o simulador para gerar imagens que representem estados de mar com mais de um pico;
- Gerar imagens SAR a partir do método direto do interpretador (o que consolidaria um novo simulador).

A partir de um acoplamento eficiente, diversas outras funcionalidades poderão ser consideradas permitindo o desenvolvimento do algoritmo interpretador. Seguem alguns exemplos:

- Incluir em uma imagem simulada manchas de óleo;
- Adaptar o simulador e o interpretador para regiões costeiras;
- Propor novas formulações para as funções de modulação;
- etc.

REFERÊNCIAS

- [1] HOLTHUIJSEN, L. H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. [S.l.]: Cambridge University Press, New York, 2007.
- [2] LANE, W. C. *The Wave Equation and Its Solutions*. April 2002. Department of Physics, Michigan State University, PROJECT PHYSNET.
- [3] KUNDU P. K. COHEN, I. M. *Fluid Mechanics*. [S.l.]: Academic Press, 2008.
- [4] WANG, B. *Digital Signal Processing Techniques and Applications in Radar Image Processing*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- [5] TEIXEIRA, S. *Radar de abertura sintética aplicado ao mapeamento e reconhecimento de zonas úmidas costeiras*. Tese (Doutorado) — Insituto de Geociências - UFPA, 2011.
- [6] KANEVSKY, M. *Radar imaging of the ocean waves*. [S.l.]: Elsevier, 2009.
- [7] LI, X. *Ocean Surface Wave Measurement Using SAR Wave Mode Data*. Tese (Doutorado) — Department of Geosciences - University of Hamburg, 2010.
- [8] NUNZIATA F.; GAMBARDELLA, A. M. M. An educational sar sea surface waves simulator. *International Journal of Remote Sensing*, v. 29, p. 11,3051–3066, 2008.
- [9] HASSELMANN K.; HASSELMANN, S. On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a synthetic aperture radar image spectrum and its inversion. *Journal of Geophysical Research*, v. 96, p. 10713–10729, 1991.
- [10] WMO. *Guide to wave analysis and forecasting*. [S.l.]: World Meteorological Organization, 1998.
- [11] TOWNE, D. H. *Wave Phenomena*. [S.l.]: Addison-Wasley, 1967.
- [12] ELMORE WILLIAM C. HEALD, M. A. *Physics of Waves*. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company, 1969.
- [13] SIGNELL PETER LANE, W. *Standing Waves in Sheets Of Material*. January 2000. Department of Physics, Michigan State University, PROJECT PHYSNET.

- [14] CARLSON, E. H. *Fourier Series and Integrals*. January 2000. Department of Physics, Michigan State University, PROJECT PHYSNET.
- [15] PAPOULIS, A. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. 3 ed. ed. [S.l.]: R.R. Donneley & Sons, 1991.
- [16] RANEY, K. *Radar Fundamentals: technical perspective*. [S.l.]: John Wiley, 1998.
- [17] NOVO, E. Bases teóricas para o uso de imagens sar no estudo de áreas alagadas. *1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal - Campo Grande, Anais*, p. 883–894, 2006.
- [18] ULABY F.T.; MOORE, R. F. A. K. Microwave remote sensing: active and passive. *Artech House*, II-Norwood, p. 331, 1986.
- [19] LEWIS A.J.; HENDERSON, F. *Radar fundamentals: The Geoscience Perspective*. [S.l.]: John Wiley, 1998.
- [20] WANG Y.; HESS, L. F. S. M. J. Understanding the radar backscattering from flooded and nonflooded amazonian forest: Results from canopy backscatter modeling. *Remote Sensing of Enviroment*, v. 54, p. 324–332, 1995.
- [21] LANG M.W.; TOWNSEND, P. K. E. Influence of incidence angle on detecting flooded forest using c-hh synthetic aperture radar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 46(2), p. 535–546, 2008.
- [22] U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*. [S.l.], Setembro 2004.
- [23] VIOLANTE-CARVALHO N; RIZOPOULOU, K. C. L. G. B. Sobre os mecanismos de imageamento do radar de abertura sintética sar a estimação do espectro direcional de ondas geradas pelo vento. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 28-4, 2010.
- [24] HASSELMANN S.; HEIMBACH, P. B. C. *The WASAR algorithm for retrieving ocean wave spectra from SAR image spectra*. [S.l.], 1998.