

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Instituto Superior de Engenharia

**LOCALIZAÇÃO DE FONTES ACÚSTICAS COM
UM *VECTOR SENSOR ARRAY***

José Miguel Duarte João

**Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Eléctrica e Electrónica – Ramo Tecnologias da Informação e
Telecomunicações**

Faro, Julho de 2011

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Instituto Superior de Engenharia

**LOCALIZAÇÃO DE FONTES ACÚSTICAS COM
UM *VECTOR SENSOR ARRAY***

José Miguel Duarte João

**Dissertação realizada sob a orientação do
Prof. Doutor Paulo Felisberto
Professor do Instituto Superior de Engenharia da
Universidade do Algarve**

**Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Eléctrica e Electrónica – Ramo Tecnologias da Informação e
Telecomunicações**

Faro, Julho de 2011

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação marca o final de uma etapa muito importante da minha vida.

Ao longo deste percurso conheci pessoas que o tornaram mais fácil. A todos os que contribuíram para me ajudar a concluir o curso, deixo o meu agradecimento. Em especial, destaco as pessoas sem as quais o percurso efectuado na Universidade do Algarve seria impossível.

Em primeiro lugar, agradeço ao Prof. Paulo Felisberto por toda a sua disponibilidade, sabedoria e vontade de ajudar, facilitando o desenvolvimento desta dissertação, que aparentava ser uma tarefa muito mais difícil.

A *Michael Porter* o cientista que coordenou toda a experiência *Makai* e aos restantes elementos da *HLS research*. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projecto SENSOCEAN FINANCIADO PELA FUNDAÇÃO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (FCT) (PTDC/EEA-ELC/104561/2008).

Aos meus pais e sogros pelo incansável apoio, que tornaram possível a realização do curso.

Aos meus primos Carlos e Guida que contribuíram com a sua sabedoria na revisão do texto.

Por fim, e não menos importante, quero agradecer à minha mulher e à minha filha, a compreensão e atenção pelo tempo que não lhes dediquei, por estar empenhado na realização deste trabalho.

A todos, o meu muito obrigado!

RESUMO

Tradicionalmente, os sistemas de aquisição de dados utilizados na acústica submarina são constituídos por antenas lineares de hidrofones, os quais medem a pressão acústica, sendo esta uma grandeza escalar. Em aplicações típicas de sonar, alguns sistemas têm sido concebidos utilizando antenas de sensores vectoriais ("*Vector Sensor Array*"-VSA), os quais, além da pressão acústica medida pelos tradicionais hidrofones medem a velocidade das partículas sobre três eixos ortogonais. Uma vantagem dos sensores vectoriais é a sua capacidade de filtragem espacial intrínseca, permitindo a resolução da ambiguidade esquerda-direita inerente às antenas lineares de hidrofones. A partir da campanha MakaiEx'05, demonstrou-se com dados reais que uma antena com poucos sensores, no caso quatro, permite estimar a direcção de chegada (azimute e elevação) de sinais em várias bandas de frequência. Pode-se então conjecturar que utilizando uma antena de sensores vectoriais e aplicando métodos de "*Match Field Processing*" se consiga obter uma localização tridimensional de uma fonte acústica onde, para além do azimute, se determine a distância e a profundidade. No presente trabalho, estuda-se a aplicação desse conceito à localização tridimensional do ruído de um navio, aplicado aos dados da referida campanha MakaiEx'05. Uma vez que a localização da fonte é conseguida com antenas de poucos elementos, este tipo de sistemas poderá ser indicado para diferentes aplicações onde seja requisito a utilização de sistemas compactos, por exemplo em AUVs (*Autonomous Underwater Vehicle*) ou outras pequenas plataformas móveis.

ABSTRACT

Traditionally, the acquisition systems used in underwater acoustics are formed by linear hydrophone array antennas, which measure scalar acoustic pressure. In typical applications of sonar, some systems have been designed using vector sensor arrays, which besides the traditional acoustic pressure measured by hydrophones measure the particle velocity on three orthogonal axes. An advantage in using vector sensors is their intrinsic spatial filtering capability allowing the resolution of the left-right ambiguity inherent of linear hydrophone antennas. From the campaign MakaiEx'05 it was demonstrated with real data that using an antenna with few sensors (4), it's possible to obtain a reliable estimate of the direction of arrival (azimuth and elevation) for signals of different frequency bands. One can then surmise that using a vector sensor antenna and applying methods of "Match Field Processing" is able to obtain a three-dimensional location of an acoustic source, where in addition the azimuth is possible to determine distance and depth. In this paper we study the application of this concept to three-dimensional location of the ship noise, applied to the data obtained in the MakaiEx'05 experiment. Once the location of the source is achieved with antennas of a few elements, such systems may be appropriate for different applications where to use compact systems, ex. on AUVs (Autonomous Underwater Vehicle) or other small mobile platforms.

Palavras chave

- Acústica submarina
- Matched Field Processing
- Antenas de sensores vectoriais
- Beamforming
- Localização

Keywords

- Underwater acoustics
- Matched Field Processing
- Vector Sensor Array
- Beamforming
- Localization

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
PALAVRAS CHAVE/KEYWORDS	IV
ÍNDICE GERAL	V
ÍNDICE DE TABELAS E FIGURAS	VII
LISTA DE ABREVIATURAS	IX

CAPITULO I

CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO ESTUDO 1

1.1 Enquadramento do trabalho	1
1.2 Objectivos.....	2
1.3 Estrutura da tese	4

CAPÍTULO II

ENQUADRAMENTO TEÓRICO 5

2.1 Introdução ao tema.....	5
2.2 Acústica submarina	7
2.2.1 Características do meio	9
2.3 Modelos utilizados na simulação do meio.....	14
2.3.1 Modelo MMPE	15
2.3.2 Modelo BELLHOP	15
2.3.3 Escolha do modelo.....	16
2.4 Antenas de sensores vectoriais.....	16
2.5 Beamforming com antenas de sensores vectoriais	19
2.6. Matched Field Processing	21

CAPÍTULO III

SIMULAÇÕES 24

3.1 O modelo de ambiente da experiência MAKAI 24

3.2 Simulação da técnica de *matched-field*..... 26

3.3 Influência da profundidade modelada..... 28

CAPÍTULO IV

DISCUSSÃO DE RESULTADOS 31

4.1 Introdução..... 31

4.2 Azimute estimado com o navio em movimento 31

4.3 Análise do ruído de navio..... 33

4.3.1 Localização de ruído no espaço tridimensional 34

4.3.2 Localização do ruído apenas com a pressão acústica..... 36

4.3.3 Localização do ruído com a pressão e a velocidade das partículas 38

4.4 Análise da influência da profundidade modelada nos resultados 41

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS 44

5.1 Conclusões..... 44

5.2 Sugestões para futuras investigações 45

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 46

LISTA DE PUBLICAÇÕES 49

ÍNDICE DE TABELAS E FIGURAS

A – TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do meio	27
-------------------------------------	----

B – FIGURAS

Figura 1 - Perfil típico da velocidade do som no oceano	11
Figura 2 - Perfis típicos da velocidade do som no oceano para diferentes latitudes[10]	12
Figura 3 - Sistema composto por um transmissor de pressão e um sensor vectorial. ..	17
Figura 4 - Geometria de propagação da onda acústica na antena [3]	20
Figura 5 - Diagrama representativo do funcionamento do MFP	22
Figura 6 - Batimetria do local e localização das fontes acústicas TB1, TB2 e VSA no dia 20/09/2005 [1]	24
Figura 7 - Sinal de pressão do hidrofone colocado a menor profundidade (79.6 mts)	25
Figura 8 - Caracterização do meio em estudo	26
Figura 9 - Perfil da velocidade do som no meio.....	27
Figura 10 - Superfície de ambiguidade para a localização simulada	28
Figura 11 - Correlação do sinal na distância para várias profundidades simuladas	29
Figura 12 - Correlação do sinal na profundidade para várias profundidades simuladas	30
Figura 13 - Morfologia do meio	32
Figura 14 - Azimute estimado durante a experiência	33
Figura 15 - Espectrograma de 10 segundos de dados.....	34
Figura 16 - Densidade espectral de potência do ruído do navio.....	34
Figura 17 - Azimute estimado para a frequência de 180 hz	35
Figura 18 - Elevação estimada para a frequência de 180 hz	35
Figura 19 – Ângulo de azimute e elevação para a frequência de 180 hz	36

Figura 20 - Superfície de ambiguidade considerando a pressão acústica.....	37
Figura 21 - Valores de correlação em função da distância.....	37
Figura 22 - Valores de correlação em função da profundidade.....	38
Figura 23 - Superfície de ambiguidade considerando a pressão e a velocidade das partículas.....	38
Figura 24 - Valor da correlação em função da distância	39
Figura 25 - Valor da correlação em função da profundidade	39
Figura 26 - Valor da correlação em função da distância nos vários instantes temporais	40
Figura 27 - Valor da correlação em função da profundidade nos vários instantes temporais	40
Figura 28 - Valor da correlação em função da distância para várias profundidades modeladas	42
Figura 29 - Valor da correlação em função da profundidade para várias profundidades modeladas	42

LISTA DE ABREVIATURAS

3D - três dimensões

AUV - Autonomous Underwater Vehicle

LFM - linear frequency modulated

MFP - Matched field processing

MMPE - Montrey – miami parabolic equation

SOFAR - Sound fixing and ranging channel

SSP - Sound speed profile

TB1 - Test Bed 1

TB2 - Test Bed 2

VS - Vector sensor

VSA - vector sensor array

CAPITULO I

CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO ESTUDO

1.1 Enquadramento do trabalho

No oceano, uma onda acústica pode percorrer várias centenas de quilómetros, dependendo das propriedades do meio (temperatura, salinidade), das interacções com as suas fronteiras (águas rasas, batimetria, tipo de fundo), da profundidade onde é colocada a fonte acústica e da frequência de emissão.

Num ambiente marinho, a propagação destas ondas, mostra-se um tanto complexa, devido à grande diversidade de fenómenos e de propriedades que se verificam nas diferentes regiões do oceano. Por exemplo, a temperatura, a profundidade, a salinidade, a existência de bolhas de ar devido à agitação do oceano, têm influência na propagação das ondas acústicas. Para além destas propriedades da camada de água, são também de grande importância as características da camada sedimentar, na medida em que, as densidades dos materiais depositados, contribuem para as condições de propagação da onda de forma significativa, especialmente para ambientes de águas rasas, vulgarmente conhecidos por águas costeiras.

A partir deste tipo de ondas mecânicas, e através da análise e do processamento de sinal, podemos extrair muita informação acerca do meio, tal como por exemplo, a temperatura da água, a profundidade do oceano, as características do fundo ou a localização de uma determinada fonte acústica (embarcação, mamífero marinho). O objectivo do presente trabalho é a localização de fontes acústicas. Em especial focar-se-á a localização do ruído de um navio,

utilizando *vector sensors*. Estes sensores têm a particularidade de medirem, para além da pressão acústica, a velocidade das partículas, obtendo-se assim um ganho no processamento dos dados referentes à estimação da origem do ruído.

Os métodos propostos serão aplicados a um conjunto de dados adquiridos em 2005 durante uma experiência que se realizou no Hawaii[1]. Através de algumas técnicas de processamento de sinal aplicadas a esses dados é possível efectuar a extracção de localizações na forma tridimensional.

1.2 Objectivos

O ambiente acústico submarino é complexo devido às suas características não homogéneas, sendo impossível resolver analiticamente casos reais de propagação. Todavia, o aparecimento dos computadores e o aumento exponencial do seu poder de cálculo permitiram o desenvolvimento de modelos numéricos avançados, com os quais é possível resolver com exactidão os problemas da propagação de ondas acústicas no oceano. Com a criação desses programas informáticos designados por “modelos de propagação”, capazes de calcular soluções acuradas, surgiram diversas técnicas de processamento de sinais acústicos, genericamente conhecidas por *model based signal processing*. Entre elas, estão as que se destinam a estimar a localização passiva de fontes acústicas.

O objectivo deste trabalho é demonstrar que é possível obter a localização tridimensional de uma determinada fonte sonora, utilizando uma técnica *model based*, conhecida por *matched field processing*, em que se compara os dados adquiridos nos sensores com réplicas geradas por um modelo de propagação. Neste caso os sensores a considerar são *vector sensors* (VS) instalados num agregado linear formando um *vector sensor array* (VSA). Este

CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO ESTUDO

equipamento tem a particularidade de medir as três componentes ortogonais da velocidade das partículas, para além da pressão acústica medida pelos tradicionais hidrofones.

Na persecução do objectivo acima referido, foram definidos os seguintes objectivos parciais:

- Estudo da acústica submarina e dos factores associados à propagação da onda neste tipo de meio;
- Estudo e utilização de modelos de propagação de ondas acústicas, para simular o meio;
- Estudo e desenvolvimento de técnicas de *beamforming* de forma a obter os ângulos azimutais e de elevação;
- Estudo e simulação do algoritmo de *matched-field* para obter a localização em distância e profundidade;
- Teste dos métodos com os dados acústicos adquiridos na experiência MAKAI'05;

Este estudo é importante, na medida em que, permitirá demonstrar que se pode realizar a localização tridimensional de uma fonte acústica submarina com dados adquiridos por um VSA e utilizando um modelo de propagação acústico.

Este trabalho está inserido na área das comunicações acústicas submarinas, no domínio do processamento de sinal. Trata-se de um contributo original, na medida em que se irá demonstrar a aplicação de conceitos teóricos conhecidos a uma aplicação prática. Pretende-se que os resultados deste estudo permitam contribuir para uma melhor compreensão e uma clarificação de alguns conceitos relacionados com as técnicas de localização de fontes acústicas, utilizando um VSA, e desenvolver sistemas simples para instalação em plataformas móveis ou de pequenas dimensões.

1.3 Estrutura da tese

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, a saber:

O capítulo I é uma introdução que apresenta o enquadramento, os objectivos e a estrutura do trabalho.

No capítulo II, é feito um enquadramento teórico com a apresentação dos principais elementos teóricos que sustentam todo o estudo. São abordados vários pontos relacionados com a acústica submarina, nomeadamente uma introdução aos modelos de propagação utilizados na simulação do meio, a descrição de antenas de sensores vectoriais, a explicação de como é feito o *beamforming* com essas antenas, sendo por fim abordado o *matched-field*.

No capítulo III, são apresentadas as simulações. São descritos o meio onde se realizou a experiência e as características dos sinais adquiridos pelo VSA. No final, é testado o *matched-field* e é avaliada a incerteza que o conhecimento da profundidade, tem nos resultados.

No capítulo IV, são apresentados e analisados os resultados obtidos com o processamento dos dados da experiência *Makai*, sendo feita uma análise do ruído do navio e dos ângulos estimados pelo *beamformer* a partir desse ruído. Numa outra parte, são verificadas as vantagens em utilizar os VSA em relação aos hidrofones, sendo comparados os valores da correlação, utilizando apenas a pressão acústica e utilizando a pressão mais as três componentes da velocidade das partículas. Neste capítulo, é ainda apresentada a influência da perturbação da profundidade da coluna de água nas estimativas das localizações obtidas por *matched field*.

O capítulo V é dedicado às conclusões e perspectivas futuras. Primeiramente, são apresentadas as conclusões extraídas pelo autor do trabalho em relação aos resultados obtidos. Por fim, são apresentadas algumas sugestões para trabalho futuro.

CAPÍTULO II

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 Introdução ao tema

A acústica submarina tem sido utilizada por animais marinhos, há milhões de anos. Alguns peixes e mamíferos que vivem no meio aquático utilizam a acústica para detectarem cardumes de peixes ou predadores. Na actualidade, a acústica submarina é utilizada para diversos fins destacando-se a sondagem do tipo de camadas de sedimento do fundo do mar, localização de depósitos minerais, obtenção da morfologia do fundo oceânico, caracterização da temperatura da água, detecção e monitorização de terremotos subaquáticos e localização de fontes acústicas.

Recuando no tempo, e falando um pouco de história, atrevo-me a dizer que a ciência da acústica submarina começou em 1490, quando Leonardo Da Vinci escreveu[2]:- "Se um navio parar no mar, e se se introduzir a extremidade de um tubo na água e colocar o ouvido na outra extremidade desse tubo, será possível ouvir outros navios a grande distância da sua posição."

A partir daqui estava aberto o caminho para a compreensão e desenvolvimento da acústica submarina e o consequente aparecimento de técnicas de processamento de sinal e de componentes como o hidrofone ou mais recentemente, os sensores vectoriais.

A localização das fontes sonoras nos diversos meios aquáticos era feita, até há pouco tempo atrás, a partir de hidrofones tradicionais que apenas medem a pressão acústica da onda sonora.

Avanços tecnológicos recentes possibilitaram o desenvolvimento de sensores vectoriais (três sensores de medição da

velocidade da partícula dispostos de forma ortogonal e um sensor de pressão omnidireccional)[3], os quais permitem determinar simultaneamente o azimute e a elevação de uma fonte sonora. A velocidade das partículas, que é o gradiente da pressão, está relacionada com o facto da propagação de uma onda acústica causar nas moléculas do meio uma alteração nas suas posições normais, isto é, nas posições que ocupam na ausência de som.

Com o objectivo de realizar vários estudos relacionados com a acústica submarina (tomografia de alta-frequência e comunicações acústicas), foi promovida em Setembro do ano de 2005 uma experiência, na costa da ilha *Kauai*, pertencente ao arquipélago do *Hawai*. Durante a experiência foi emitido um conjunto de sinais de várias frequências a partir de duas fontes sonoras controladas, os quais foram adquiridos por uma antena de sensores vectoriais, composta por quatro elementos[1]. Para além desses sinais controlados, foi também captado ruído, nomeadamente do navio. Esse ruído, será analisado e a sua localização demonstrada, aplicando algumas técnicas de filtragem espacial descritas nos capítulos seguintes.

Para se obter a localização das fontes sonoras, serão utilizadas técnicas de *matched field*, que consiste na correlação entre os dados reais e o campo acústico calculado por um modelo de propagação, considerando determinados parâmetros de propagação das ondas acústicas no meio. Os pontos (distância da fonte, profundidade e azimute) onde a correlação é máxima, permitem a localização da fonte.

Para este trabalho foi utilizado o modelo de *ray tracing* BELLHOP [4], tendo inicialmente sido feitas algumas simulações utilizando o modelo *parabolic equation* MMPE[5]. Dado que para este último, os tempos de resolução computacional serem superiores, optou-se pela utilização do modelo BELLHOP, mais simples de configurar e com tempos de execução mais reduzidos.

2.2 Acústica submarina

As grandes massas de água, tais como, oceanos, lagos e rios, cobrem mais de dois terços da superfície de nosso planeta. Para os seres humanos, os mares são e permanecem, essencialmente um meio hostil, desconhecido, e inexplorado. Por este motivo, foram desenvolvidas algumas técnicas no sentido de sondar o mar à distância. Utilizar meios ópticos não é possível, excepto para curtas distâncias, por causa da opacidade do meio. Também as ondas electromagnéticas são fortemente atenuadas devido à condutibilidade da água. Face a estes condicionalismos temos como opção a utilização de ondas acústicas longitudinais, que têm uma excelente propagação no oceano, constituindo excelentes vectores para recolher informação, no que diz respeito ao que se encontra no meio aquático e até mesmo na camada sedimentar do fundo do mar.

Para analisar as características do oceano é comum utilizar-se dois métodos, o passivo e o activo. O método passivo caracteriza-se por sondar o mar à distância através da detecção de sons emitidos naturalmente no interior do meio ou por alguma fonte artificial, não controlada. Através da análise destes sons e utilizando o processamento de sinal, é possível obter informações acerca da existência de fontes sonoras, como por exemplo a detecção de mamíferos ou de equipamento motorizado que esteja a emitir ondas acústicas.

No método activo é emitido um sinal acústico a partir de uma fonte controlada, para depois esse sinal ser recebido num receptor que pode ser um hidrofone ou um sensor vectorial. A análise deste sinal permite, por exemplo determinar a temperatura do meio, o tipo de solo existente no fundo do oceano, a velocidade de propagação do som, entre outros.

As áreas de interesse em relação à acústica submarina são as mais variadas, pelo que passo a citar algumas aplicações[6]:

- Localização de fontes acústicas: - com recurso a algumas técnicas é possível obter uma localização a 3D da origem de uma fonte sonora que emita numa determinada banda de frequência. Exemplo disso, são a localização de mamíferos e peixes, que emitem sons, de submarinos, de navios, etc.
- Em relação à camada sedimentar, a acústica também pode ser utilizada para pesquisa de poços de petróleo, classificação de depósitos minerais existentes no fundo do mar, estudar o tipo de solo para colocação de pontes ou plataformas petrolíferas, para detecção, localização, caracterização, e monitorização de terremotos subaquáticos e actividade vulcânica, etc.
- Uma outra aplicação da acústica é na detecção de cabos submersos, tubos de transporte de petróleo e gás, etc.

A utilização do som como técnica de monitorização remota tem vantagens em relação aos métodos de pesquisa directa (medir a profundidade ou recolher amostra do fundo do solo), devido aos elevados custos da instrumentação e da operacionalidade, sendo necessário disponibilizar plataformas, navios ou submarinos de suporte aos equipamentos.

Para facilitar os trabalhos de engenharia, relacionado com o estudo dos meios aquáticos, têm vindo a ser utilizadas técnicas de modelação como forma de avançar na compreensão científica e na estimação de diversas variáveis relacionadas com a acústica submarina, a um custo reduzido. Conhecendo algumas características do oceano, tais como, a temperatura, a salinidade, o tipo de fundo, entre outras, é possível modelar e estudar a propagação nesse meio e a influência dos diferentes parâmetros. Neste caso falamos do problema directo.

Por outro lado, os modelos de propagação podem ser utilizados para estimar os valores dos parâmetros do meio, a partir de dados

acústicos (pressões e velocidades das partículas) medidos. Neste caso falamos de problemas inversos.

Considerando que os dados acústicos são adquiridos por um VSA, que disponibiliza, para além da pressão acústica, a velocidade das partículas, o maior problema é encontrar um modelo tridimensional, que seja realístico em relação à interacção do som com o tipo de meio em análise. Para este caso em particular, o modelo deverá considerar a pressão e as componentes da velocidade da partícula ao longo do meio onde os dados são adquiridos, considerando a frequência de interesse.

Os modelos de propagação disponíveis, permitem modelar o meio com alguma exactidão, no entanto, negligenciam ainda algumas das características do meio e/ou da sua interacção com a onda acústica.

2.2.1 Características do meio

Uma onda acústica plana ao atravessar um meio composto por um fluido com a densidade ρ , exerce uma pressão p sobre cada partícula, dada por:

$$p = \rho c u , \quad (1)$$

onde c é a velocidade do som e u a velocidade da partícula do fluido[7].

O parâmetro fluídico ρc é chamado de resistência específica acústica. Este parâmetro, para o oceano tem o valor médio de 1.5×10^5 g/cm², enquanto que para o ar o valor é de 42 g/cm². Este parâmetro pode assumir um valor complexo passando a designar-se impedância acústica específica e está relacionado com o facto de o meio apresentar uma certa resistência à propagação da onda acústica.

A velocidade do som foi medida inicialmente em 1827 pelo cientista suíço *Jean-Daniel Colladen* (1802-1893) e pelo matemático francês

Charles Sturm (1803-1855) que colaboraram numa experiência que consistiu em bater num sino submerso no lago Genebra. O intervalo de tempo entre a emissão da onda e a sua recepção foi cronometrado, e obtiveram um valor de 1435 m/s para uma temperatura da água de 8.1°C, que é surpreendentemente próximo do valor medido actualmente.

As expressões empíricas para o cálculo da velocidade do som nos meios aquáticos resultam a partir de três variáveis básicas: a temperatura, a salinidade e a pressão que está relacionada com a profundidade. Excluem-se a presença de factores externos tais como organismos biológicos e bolhas de ar, sendo que até hoje, não foi encontrada nenhuma outra propriedade física que afecte a velocidade de som no oceano.

Assim, a velocidade de som no mar está relacionada com os parâmetros físicos do oceano e pode ser vista como uma função que aumenta com temperatura, profundidade e a salinidade. Uma forma possível para representar essa dependência é a expressão:

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016z, \quad (2)$$

que é conhecida como a fórmula de Mackenzie [8],[9], em que c representa a velocidade do som traduzida em (m/s), T a temperatura em (°C), S a salinidade (ppm) e z a profundidade (m).

Como forma de representar a velocidade do som no oceano e considerando a expressão (2), podemos elaborar um perfil típico para esta grandeza considerando a coluna de água existente no oceano.

A figura 1 mostra um perfil típico da velocidade do som típico para o oceano, verificando-se a existência de várias camadas hidrográficas.

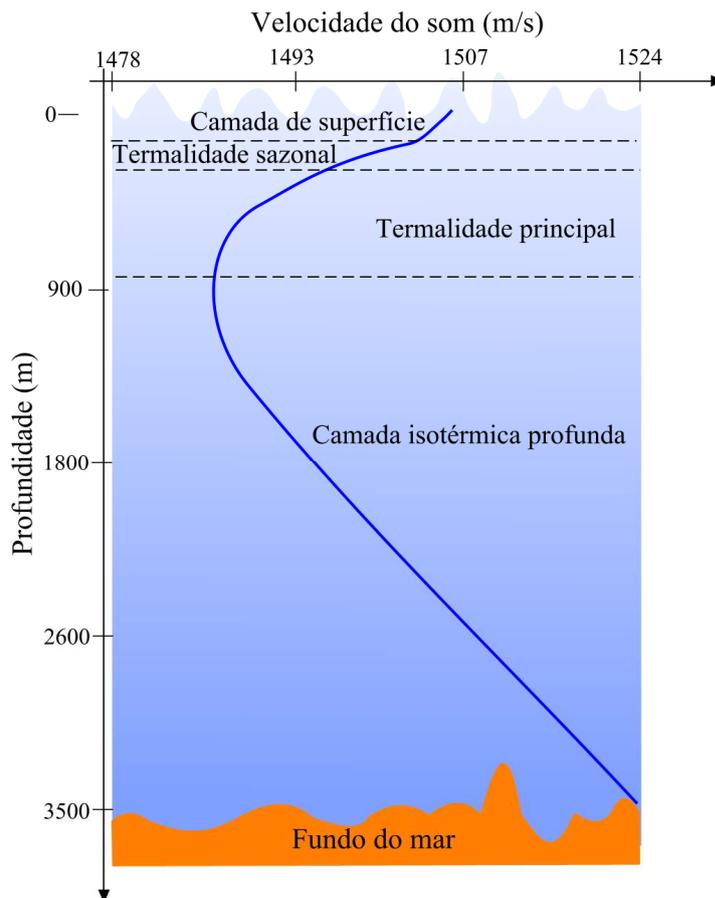


Figura 1 - Perfil típico da velocidade do som no oceano

Assim junto à superfície, encontramos a camada de superfície que se caracteriza por ter uma velocidade de som que pode variar diariamente devido à alteração da temperatura da água resultante da influência solar. Nesta camada, pode também existir pela acção do vento, uma mistura das águas superficiais com as mais profundas e conseqüentemente a temperatura tende a ser constante. Por outro lado, em dias calmos e ensolarados consecutivos, esta mistura de água dissipa-se, criando uma temperatura decrescente à medida que a profundidade vai aumentando.

Imediatamente abaixo da camada de superfície, encontra-se a termalidade sazonal. Esta representa uma zona em que a temperatura varia com a profundidade, sendo caracterizada geralmente por uma inclinação negativa térmica ou por um gradiente da velocidade decrescente, significando que a temperatura e a

velocidade do som diminuem à medida que a profundidade vai sendo maior, esta situação está igualmente dependente da estação do ano, daí a sua denominação.

Abaixo da termalidade sazonal encontra-se a camada designada por termalidade principal ou termoclina, em que a temperatura apresenta uma grande variação ao longo das estações.

Segue-se a camada isotérmica profunda, que apresenta uma temperatura quase constante (aproximadamente 3^o-4^oC) em que a velocidade de som aumenta com a profundidade devido ao efeito da pressão, conforme mostra a expressão (2).

A figura 2 mostra as várias camadas térmicas e também os perfis típicos para a velocidade do som em função da profundidade, nas regiões polares e junto ao equador.

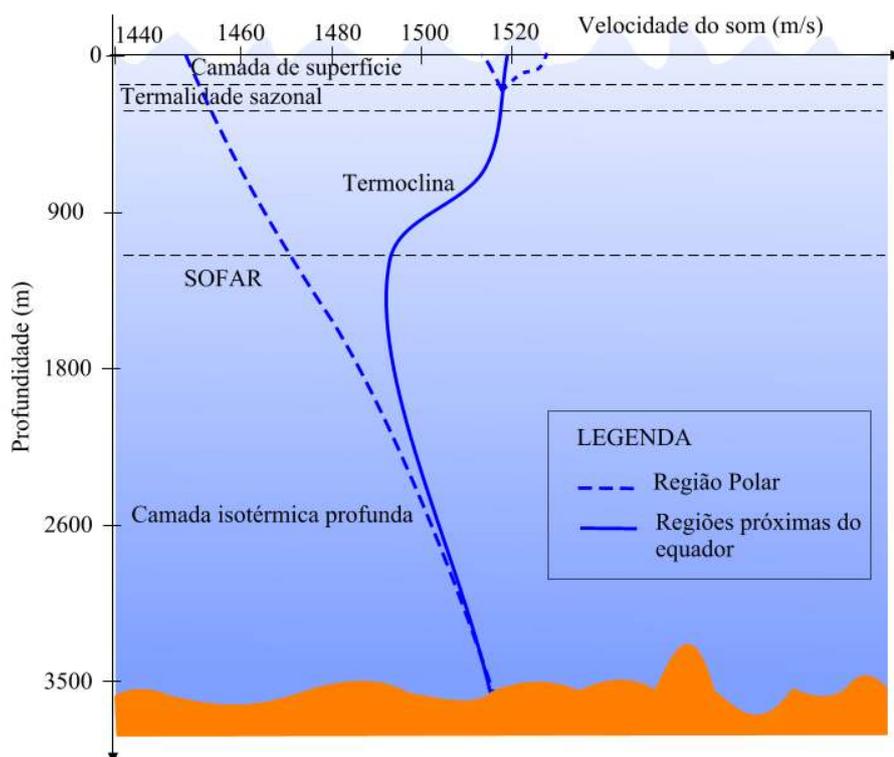


Figura 2 - Perfis típicos da velocidade do som no oceano para diferentes latitudes[10]

Devido à variação da velocidade do som com a profundidade, uma onda sonora sofre efeitos de refração, isto é, sofre mudanças de direcção. Como resultado geral da refração, podemos dizer que as ondas acústicas têm tendência a se guiarem para a zona onde a velocidade do som é menor. Consequentemente, a zona próxima dos 1000 m de profundidade (mínimo da velocidade do som) funciona como uma zona de "concentração" das ondas acústicas (venham elas da camada acima ou abaixo desse nível). Para esta profundidade o meio comporta-se como um guia de ondas acústicas, sendo chamado o canal SOFAR – "*Sound Fixing and Ranging*". Este canal de som é muito eficiente na transmissão acústica, porque a energia sonora ao ser focalizada não sofre dispersão e pode ser transmitida a grandes distâncias. As ondas acústicas que entram no SOFAR sofrem pouca atenuação e podem ser registadas por estações sismográficas a grandes distâncias.

Considerando que o meio aquático onde foi feita a experiência é um meio pouco profundo, pois apresenta uma coluna de água com cerca de uma centena de metros, este meio é também chamado de águas rasas. A propagação das ondas acústicas a baixas frequências nestes meios é afectada pela diferença de impedâncias acústicas existente entre a água e o ar, sendo total a reflexão na superfície, com mudança de fase de 180 graus. Por outro lado, a interacção das ondas acústicas com o fundo do mar, provoca uma forte atenuação que aumenta normalmente com a frequência. Devido a estas reflexões entre o fundo do oceano e a superfície pode ocorrer o *multipath*, em que a onda pode interferir com ela própria de forma construtiva ou destrutiva. No caso construtivo, garante-se a propagação a grandes distâncias[11] e, no caso contrário, a propagação é atenuada e teremos uma perda de sinal.

2.3 Modelos utilizados na simulação do meio

Uma das possibilidades de modelar o canal acústico submarino, consiste na resolução da equação de *Helmholtz* para diferentes frequências. Existem vários modelos matemáticos que podem ser aplicados no estudo da propagação do som, sem existir contudo um modelo único, devido à complexidade dos factores intervenientes, capaz de modelar o meio com exactidão. Este facto, exige simplificações que só são válidas para determinados limites de variação dos parâmetros. Existem pelo menos três metodologias utilizadas para modelar a propagação do som no mar:

- uma inspirada na teoria da reflexão dos raios, com base nas leis de SNELL, válida para águas rasas, pequenas distâncias e frequências elevadas[11], conhecido como modelo de raios;
- outra baseada nos modos normais, que deriva da teoria das vibrações acústicas no estudo dos instrumentos musicais, a qual deve ser utilizada para grandes distâncias e frequências baixas[11], conhecido como modelo de modos normais;
- Por fim, uma outra, em que a equação de *Helmholtz* é transformada numa equação chamada de *parabolic equation*. Esta última metodologia deve ser utilizada quando o guia de ondas na camada de água varia pouco em função da distância[12].

Para qualquer problema de acústica submarina, a escolha de um modelo ambiental capaz de representar as propriedades do canal de propagação é de importância fundamental. De uma forma geral, esse modelo necessita à *priori* informação para descrever o meio em estudo. Os modelos estudados são modelos 2D, que disponibilizam, para além da pressão acústica, uma componente horizontal e uma vertical da velocidade das partículas.

2.3.1 Modelo MMPE

No início dos anos 90, um código numérico conhecido como “*University of Miami Parabolic Equation (UMPE) Model*” [13] foi documentado e disponibilizado para a simulação de meios aquáticos em geral. Este modelo é baseado na técnica de *split-step Fourier (SSF)* [14], e foi adaptado de versões anteriores desenvolvidas por Fred Tappert da Universidade de Miami. Uma versão posterior do modelo, conhecida como o *Monterey-Miami Parabolic Equation (MMPE)*, foi desenvolvida em meados da década de 90, sendo mais simples de utilizar e mais amigável.

Este modelo foi testado exaustivamente em vários cenários sendo que o mesmo mostrava resultados aceitáveis em ambiente de águas rasas, que foram utilizadas na experiência *Shallow Water Acoustic Modeling Workshop help in Monterey, CA* in 1999 (SWAM’99). [15].

2.3.2 Modelo BELLHOP

É um modelo de raios de alta eficiência, escrito em *Fortran* por *Michael Porter* e foi desenhado para simular meios aquáticos a duas dimensões. Este modelo é baseado na teoria dos raios, obedecendo às leis de SNELL.

A forma como se propaga uma onda numa perturbação de densidade (i.e., uma modificação brusca da pressão, da temperatura ou da salinidade) dentro de um fluído, pode ser descrita pela aplicação do princípio de *Huygens* [16], em virtude de cada ponto da frente de onda poder ser considerado como uma fonte de ondas secundárias que se movem para frente e cuja envoltória constitui uma nova frente de onda. Para este modelo, o cálculo da pressão acústica é baseado na teoria dos feixes *Gaussianos* [17] [18].

2.3.3 Escolha do modelo

Qualquer um dos modelos apresentados anteriormente consegue resolver, de forma eficaz, a equação da onda e conseqüentemente fazer a simulação do meio. As diferenças estão na simplicidade e na forma de obter os valores da pressão para cada ponto em estudo.

Inicialmente utilizou-se o modelo MMPE para fazer a simulação do meio, uma vez que este modelo era simples de configurar.

Mais tarde, quando se necessitou de executar o modelo para diferentes distâncias e profundidades, verificou-se que a sua exigência computacional era bastante elevada e o seu interface, não adequado para a implementação do *matched-field*.

Já o modelo BELLHOP, apresenta uma forma mais fácil de calcular estes valores, sendo de mais rápida execução e de configuração mais amigável, optando-se por utilizar este modelo.

2.4 Antenas de sensores vectoriais

Os sensores vectoriais para além da pressão acústica medem as três componentes ortogonais da velocidade das partículas. Estes sensores têm vindo a ser utilizados em aplicações de SONAR (*Sound Navigation And Ranging*) e localização de fontes sonoras, uma vez que permitem estimar o azimute e a elevação, resolvendo a ambigüidade esquerda-direita presente nas *antenas lineares* de hidrofones[19]. Por outro lado, e uma vez que as antenas de sensores vectoriais são mais direccionais do que um simples hidrofone, é possível a filtragem espacial do sinal acústico captado por um único elemento.

Na figura 3, que mostra um sensor vectorial, podemos ver esquematizadas as componentes da velocidade das partículas e da pressão adquiridas no sensor.

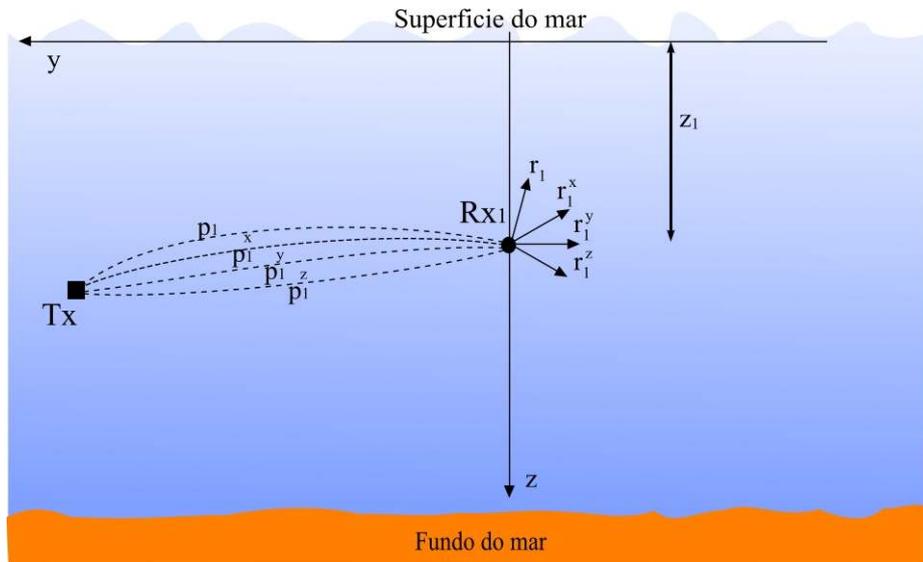


Figura 3 - Sistema composto por um transmissor de pressão e um sensor vectorial. Tx representa a fonte acústica e Rx o VSA[20]

Para explicar o funcionamento dos sensores vectoriais, vamos considerar um sistema com uma fonte acústica T_x e um sensor R_{x1} que estão posicionados a grande distância um do outro. O sensor está localizado na posição $y=0$ e a uma profundidade $z=z_1$. Este sensor vectorial mede a pressão acústica assim como as três componentes da velocidade da partícula, conforme mostra a figura 3 (r_1, r_1^x, r_1^y, r_1^z). Quer isto dizer que a cada sensor irá chegar um valor de pressão acústica e três componentes da velocidade da partícula designadas por p_1^x, p_1^y, p_1^z , representados nesta figura, por linhas a tracejado. Para definir p_1^x, p_1^y, p_1^z , necessitamos de definir as velocidades da partícula v_1^x, v_1^y, v_1^z , em (m/s). De acordo com as equações de conservação do momento linear[21], as componentes da velocidade da partícula em x,y e z, na profundidade z_1 , considerando o lado onde são emitidas e à frequência f_0 , podem ser escritas de acordo com a seguinte equação:

$$v_1^x = -\frac{1}{j\rho_0\omega_0} \frac{\partial p_1}{\partial x}; v_1^y = -\frac{1}{j\rho_0\omega_0} \frac{\partial p_1}{\partial y}; v_1^z = -\frac{1}{j\rho_0\omega_0} \frac{\partial p_1}{\partial z}, \quad (3)$$

Na equação de cima, também conhecida como equação de Euler, ρ_0 é a densidade do fluído (kg/m^3) e $\omega_0=2\pi f_0$, representa a frequência em rad/s. A equação (3) apenas mostra que a velocidade numa determinada direcção é proporcional ao gradiente espacial da pressão naquela direcção. Para simplificar a notação, se multiplicarmos as componentes da velocidade da equação (3) por $-\rho_0 c$ que é a impedância acústica do fluído, onde c representa a velocidade do som em m/s, iremos obter a velocidade da partícula associada à pressão:

$$p_1^x = -\rho_0 c v_1^x ; p_1^y = -\rho_0 c v_1^y ; p_1^z = -\rho_0 c v_1^z , \quad (4)$$

Considerando λ o comprimento de onda em (m) e o factor $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega_0}{c}$, como o número de onda em (m/s), obtemos finalmente a expressão

$$p_1^x = \frac{1}{jk} \frac{\partial p_1}{\partial x} ; p_1^y = \frac{1}{jk} \frac{\partial p_1}{\partial y} ; p_1^z = \frac{1}{jk} \frac{\partial p_1}{\partial z} , \quad (5)$$

Para o caso ideal, cada sensor vectorial disponibiliza quatro sinais de saída, compostos pelo sinal que se está efectivamente a medir. Na prática, há que considerar ainda o ruído introduzido pelos circuitos electrónicos. Por exemplo, R_{x1} gera um sinal de pressão acústica r_1 e três sinais de velocidade da partícula r_1^x , r_1^y e r_1^z , medidos nas direcções de x, y e z . Se 'S' representar o sinal emitido, então os sinais na saída do sensor podem ser escritos conforme indica a expressão (6). Através desta expressão podemos ver que o sinal recolhido em cada VSA é composto pelo sinal desejado, mais uma certa quantidade de ruído.

$$\begin{aligned}
r_1 &= p_1 \oplus s + n_1, \\
r_1^x &= p_1^x \oplus s + n_1^x, \\
r_1^y &= p_1^y \oplus s + n_1^y, \\
r_1^z &= p_1^z \oplus s + n_1^z,
\end{aligned} \tag{6}$$

Na equação anterior o sinal \oplus representa a convolução entre o sinal 'p' e o 's', sendo que n representa o ruído de cada canal (x,y,z).

Existem dois tipos de sensores vectoriais: os sensores de inércia e os de gradiente. Os sensores de inércia medem a velocidade ou a aceleração, respondendo ao movimento acústico da partícula, enquanto que os sensores de gradiente empregam uma aproximação para estimar a velocidade e a aceleração do campo acústico. Cada tipo de sensor tem seus próprios méritos e limitações [22]. Dependendo da aplicação, do custo do sistema, da precisão exigida, o projectista pode escolher o tipo e a tecnologia apropriadas à aplicação pretendida.

Por forma, a melhorar a performance do sistema, este tipo de sensores podem ser agrupados e configurados como *array's*, oferecendo uma maior directividade ao sistema.

2.5 Beamforming com antenas de sensores vectoriais

Considere-se um ruído do navio como uma onda plana de uma determinada frequência. Para resolver a localização deste ruído com um *vector sensor array* (VSA), é aplicado um *beamformer*. Este *beamformer*, consiste num algoritmo que realiza processamento de sinal adaptativo espacial numa antena de sensores vectoriais, a fim de transmitir ou receber sinais de diferentes direcções sem ter ajustar mecanicamente a antena.

Para explicar o *beamforming* vamos assumir uma antena de sensores vectoriais dispostos conforme mostra a figura 4, onde os elementos estão equiespaçados no eixo z, sendo que o primeiro está colocado na origem do sistema de coordenadas. Para a determinação do ângulo de azimute e de elevação, foi escolhido um

beamformer que utilize a direcção dos cosenos como peso para determinar as componentes das velocidades das partículas e o valor unitário para a pressão.

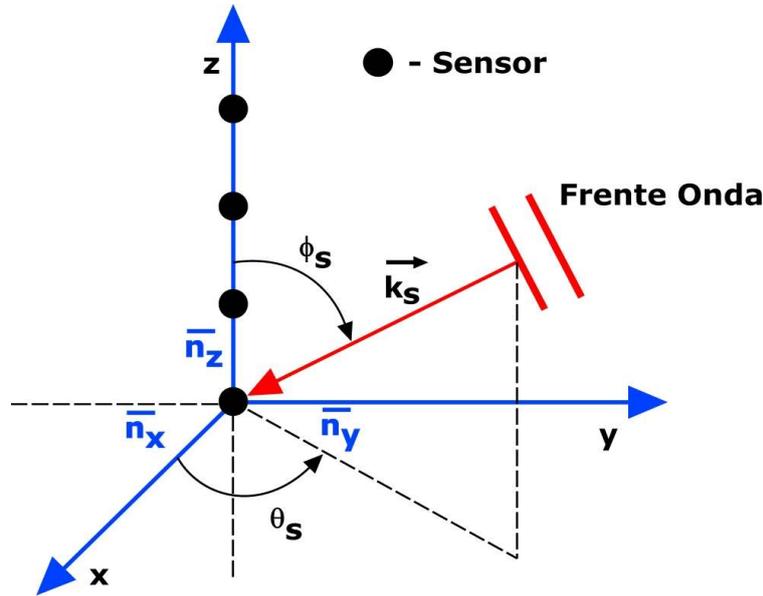


Figura 4 - Geometria de propagação da onda acústica na antena [3]

Assim sendo, para o elemento i do array, o vector peso é dado por

$$W_i = [W_{pi}, W_{xi}, W_{yi}, W_{zi}] = [1, \cos(\theta_s) \sin(\phi_s), \sin(\theta_s) \sin(\phi_s), \cos(\phi_s)] \times e^{i \vec{k}_s \cdot \vec{r}}, \quad (7)$$

para $i=1, \dots, N$, onde N é o número de elementos do VSA, \vec{K}_s é o vector número de onda, correspondente à direcção procurada (ϕ_s, θ_s) , \vec{r} é a posição dos elementos da antena e ϕ_s e θ_s são os ângulos de elevação e de azimute, respectivamente.

Cada elemento sensor mede a pressão acústica e as três componentes da velocidade da partícula, que são combinadas utilizando um *weighting vector* [3].

Considerando que os dados reais foram obtidos por uma antena de quatro elementos, iremos ter um *weighting vector* W com dimensão $4N \times 1$, conforme a expressão seguinte:

$$W(\phi_s, \theta_s) = [W_1, W_2, W_3, W_4], \quad (8)$$

Para um VSA com N elementos e considerando as equações anteriores, a direcção de chegada é dada pelos valores ϕ_s e θ_s , que maximizam a expressão:

$$B(\phi_s, \theta_s, f) = W(\phi_s, \theta_s, f) \cdot R(f) \cdot W^T(\phi_s, \theta_s, f), \quad (9)$$

onde $R(f)$ é a matriz de correlação normalizada e estimada para cada frequência de interesse, calculada através de:

$$R(f) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K A_k \cdot A_k^T, \quad (10)$$

sendo K, o número de janelas contidas no intervalo dos dados considerado, tendo em conta a frequência de amostragem e o número de pontos da FFT utilizada. O vector A_k representa o bin da FFT da frequência de interesse, na janela k que contém os dezasseis canais dos quatro VSA.

2.6. Matched Field Processing

Matched-field Processing (MFP) foi originalmente proposto para a localização de fontes sonoras, onde é aplicado um processador e é calculada uma superfície de ambiguidade. Esta superfície não é mais do que o valor máximo que o processador toma para cada realização dos parâmetros no intervalo de busca, e corresponde à verdadeira posição da fonte. Para este estudo foi considerado o processador de *Bartlett*, sendo este o mais popular e o mais simples de implementar. Este processador executa a correlação linear entre o campo observado, ou seja os dados recolhidos pelo VSA, e o campo

previsto a partir do modelo de propagação, configurado com os parâmetros do meio designados por *density*(ρ), *compressional attenuation* (α), *compressional speed* (c_p) e *sound speed profile* $c(z)$). A figura 5 ilustra o funcionamento da técnica de MFP.

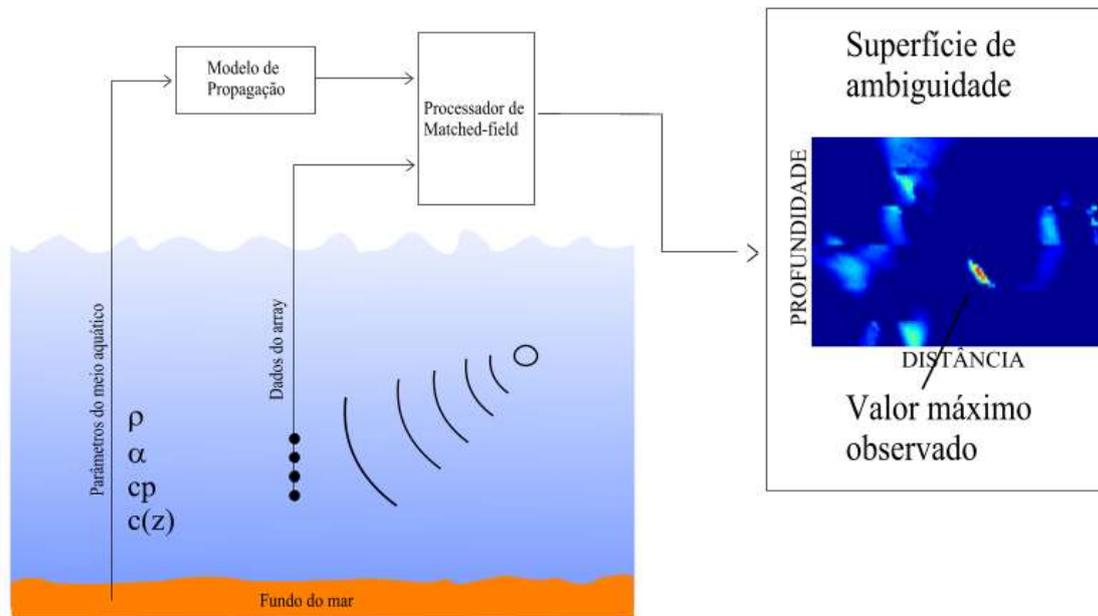


Figura 5 - Diagrama representativo do funcionamento do MFP

O processador foi adaptado aos quatro canais de cada VSA e permite comparar as semelhanças entre o campo observado e o previsto.

O campo previsto foi gerado pelo modelo BELLHOP[4], que é um modelo de raios desenvolvido para modelar ondas acústicas bidimensionais em meios aquáticos. Este modelo calcula os valores da pressão acústica e também as componentes horizontal e vertical da velocidade da partícula.

Uma vez que este modelo não disponibiliza a velocidade das partículas segundo as direcções tridimensionais, as componentes v_x e v_y são calculadas projectando a componente horizontal v_r na direcção azimutal da fonte acústica, estimada previamente utilizando o *beamformer*.

A superfície de ambiguidade, no intervalo de pesquisa, é dada por:

$$P_{BT}(r, d, f) = W_{md}^T(r, d, f) \times R(f) \times W_{md}(r, d, f) \cdot \quad (11)$$

onde r representa a distância e d a profundidade, W_{md} é o vector dos dados obtidos a partir do modelo à frequência f , enquanto que $R(f)$ é a matriz de correlação estimada para o campo acústico observado à frequência f .

Devido às potencialidades que os VSA têm de fornecer informação direccional e da sua capacidade de filtragem espacial intrínseca, é possível obter a localização de fontes acústicas, relativamente à distância, profundidade e segundo uma direcção azimutal, com um menor número de sensores, quando comparado com a utilização de antenas de hidrofones.

CAPÍTULO III

SIMULAÇÕES

3.1 O modelo de ambiente da experiência MAKAI

Neste ponto iremos descrever a experiência MAKAI, que serviu para estudar a aplicação dos métodos descritos anteriormente a um ambiente real. Assim, serão apresentadas algumas simulações tendo por base um ambiente semelhante ao da experiência. No próximo capítulo discutiremos os resultados obtidos directamente a partir dos dados reais adquiridos.

A experiência Makai Ex 2005 teve lugar entre os dias 15 de Setembro e o dia 02 de Outubro, na costa do Hawai. O seu objectivo foi testar métodos de tomografia e comunicações acústicas de alta frequência. Para caracterizar o ambiente fez-se uma série de medidas ambientais utilizando sinais acústicos emitidos de forma controlada pelas fontes colocadas em pontos estratégicos e designadas por TB1 e TB2, conforme mostra a figura 6.

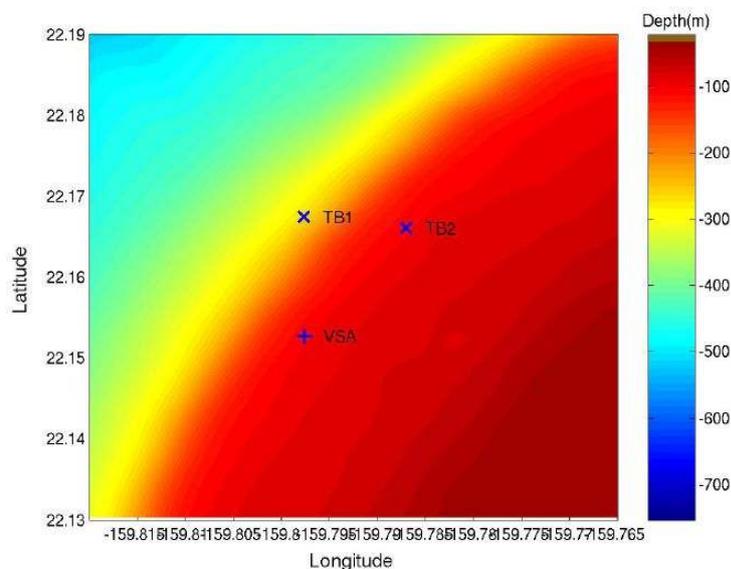


Figura 6 - Batimetria do local e localização das fontes acústicas TB1, TB2 e VSA no dia 20/09/2005 [1]

Estes dados foram recolhidos através de um array composto por quatro sensores vectoriais, com um espaçamento de 10 cm e amarrados na vertical por um cabo na popa do navio Kilo Moana que estava fundeado a uma distância de 1830 metros da fonte TB2.

A figura 7 representa uma amostra de 10 segundos do sinal recolhido pelo vector sensor mais próximo da superfície.

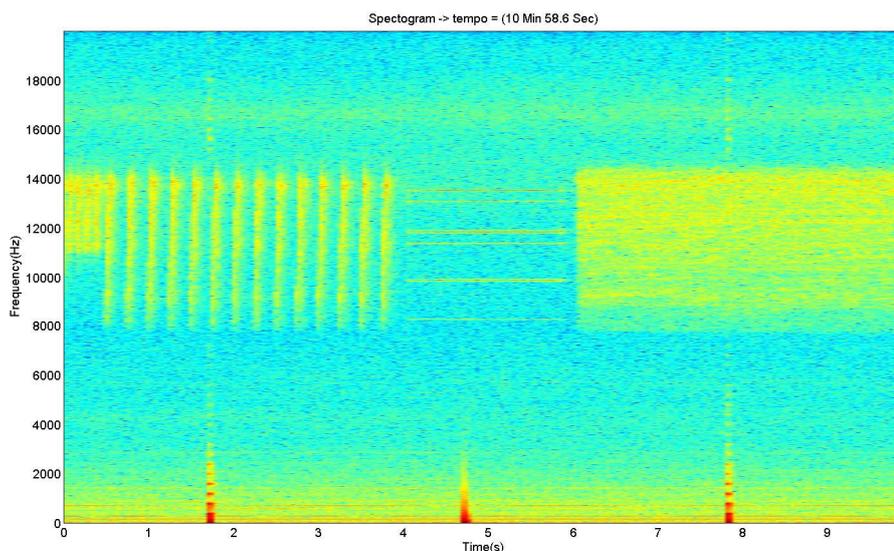


Figura 7 - Sinal de pressão do hidrofone colocado a menor profundidade (79.6 mts)

Pela figura anterior podemos ver que existem três tipos de sinais e da esquerda para a direita temos:

1. A primeira região é ocupada por LFM, com a frequência a variar de 8-14 KHz, com a duração de cerca de 4 segundos.
2. A segunda região é composta por tons a variar entre os 8-14 KHz, com a duração de 2 segundos;
3. Por fim temos uma M-Sequence centrada nos 11 KHz e com a duração de 4 segundos;

Para além destes sinais, foi ainda captado pelo VSA, uma componente de baixa frequência que se considera ser de ruído produzido no navio. A sua localização irá ser demonstrada no capítulo seguinte.

3.2 Simulação da técnica de *matched-field*

A fim de testar a técnica de *matched-field* apresentada no ponto 2.6, e de ter uma ideia da sua performance quando aplicada aos dados reais, vamos considerar que o ambiente e a geometria do meio utilizado na simulação têm as mesmas características que o cenário onde os dados reais foram adquiridos.

Para aplicar esta técnica vamos considerar o VSA descrito anteriormente, colocado a uma profundidade de 79.6 metros (sensor mais próximo da superfície), conforme mostra a figura 8. Este meio tem 104 metros de coluna de água, apresenta uma batimetria *range independent* e um perfil da velocidade do som (SSP) conforme a figura 9. O local onde se realizou a experiência pode-se caracterizar por um ambiente de águas rasas, com o fundo do mar, a ser composto por duas camadas de areia sob uma sólida camada de basalto, conforme características indicadas na tabela 1.

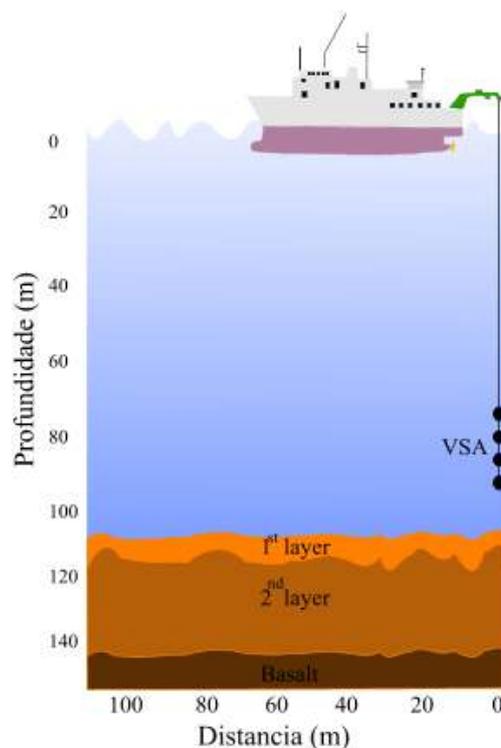


Figura 8 - Caracterização do meio em estudo

Para a simulação das pressões e das velocidades das partículas, foi utilizado o modelo de raios BELLHOP, considerando-se os parâmetros do meio indicados na tabela 1.

Parâmetro	Areia (1. ^a camada)	Areia (2. ^a camada)	Basalto
Thickness (m)	0.175	45.825	-
Compressional speed C_p (m/s)	1565	1700	2330
Density (g/cm^3)	1.5	2.1	2.1
Compressional attenuation Alpha (dB/λ)	0.6	0.1	0.1

Tabela 1 - Parâmetros do meio

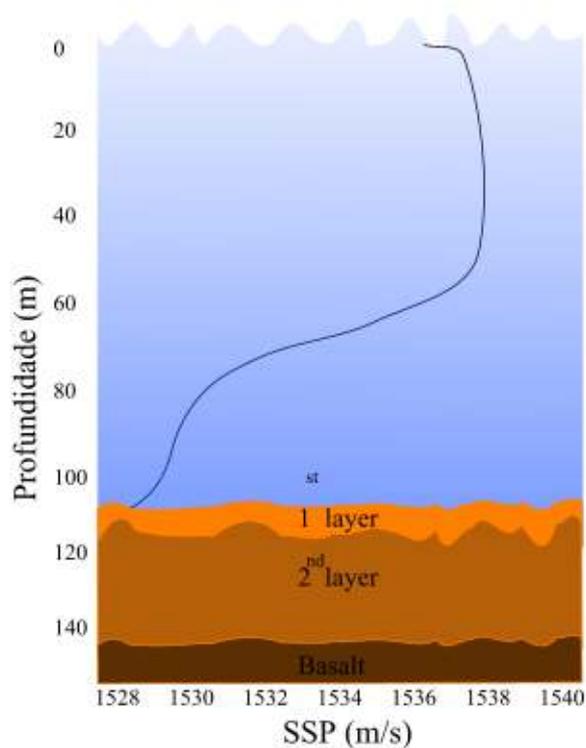


Figura 9 - Perfil da velocidade do som no meio

O meio foi discretizado na distância e na profundidade com um passo de 10 cm. Considerando que se procurava a localização do ruído característico do navio, foi feita uma pesquisa de valores entre os 0-20 metros de profundidade e os 0-100 metros na distância.

De seguida, iremos analisar uma simulação com uma posição conhecida da fonte acústica para testar o método. Por exemplo, se

considerarmos a fonte acústica colocada a 15 metros de profundidade e a 58 de distância e aplicando a equação (11), obtemos então a superfície de ambiguidade da figura 10.

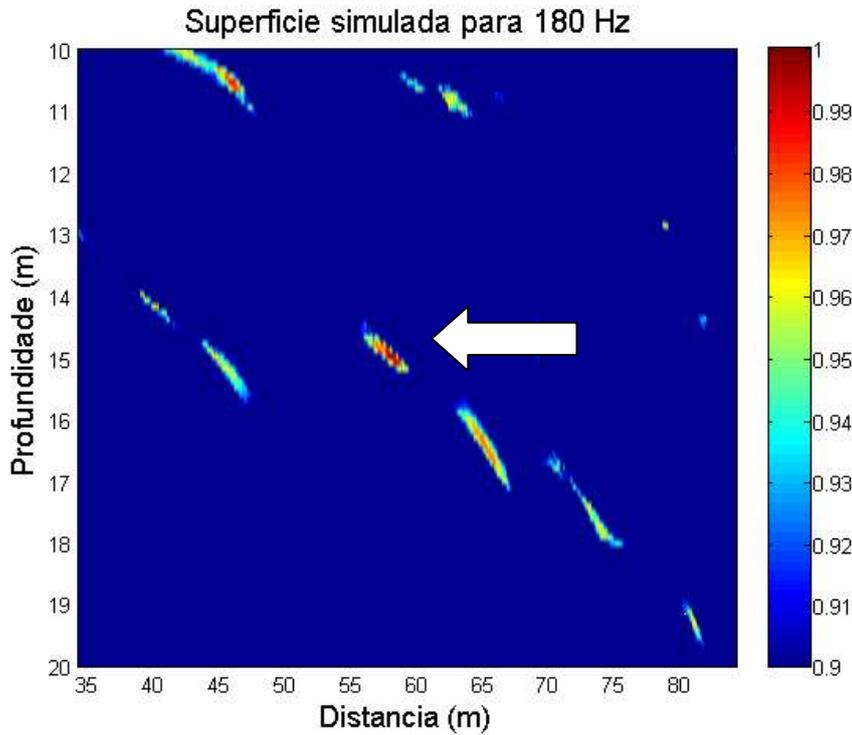


Figura 10 - Superfície de ambiguidade para a localização simulada

Podemos ver através da figura anterior que existe um máximo definido (cor a vermelho) do valor da correlação, sendo este o ponto estimado para localização da fonte sonora. Podemos ainda verificar no gráfico a existência de potenciais localizações dadas por lóbulos secundários, que mostram a correspondência feita pelo processador considerando os dados modelados.

3.3 Influência da profundidade modelada

Para se obter uma localização tridimensional de uma fonte acústica, para além de dados reais, é necessário simular o meio com um modelo. A fim de verificar a influência que a profundidade configurada no modelo tem na localização da fonte acústica, iremos considerar o mesmo meio aquático, descrito no ponto anterior, e

configurar no modelo três profundidades diferentes. A partir dos dados modelados é efectuada uma correlação entre os sinais, ou seja, são comparados quantitativamente dois sinais modelados de maneira a avaliar a similaridade entre as funções.

Nas simulações anteriores considerou-se que altura da coluna de água era conhecida. Tratando-se de águas pouco profundas, espera-se que um desajuste na altura da coluna de água possa ter uma influência importante no resultado. Assim, nesta secção vamos considerar que a altura da coluna de água é 104m e vamos fazer a correlação, considerando réplicas para alturas da coluna de água de 102m, 104m e 106m. As correlações obtidas para as réplicas de 102 e 106m, quando comparadas com a altura verdadeira de 104m dão uma ideia da influência da incerteza desse parâmetro no resultado. As figuras 11 e 12 mostram os valores da correlação obtidos na distância e na profundidade, para as três alturas da camada de água configuradas.

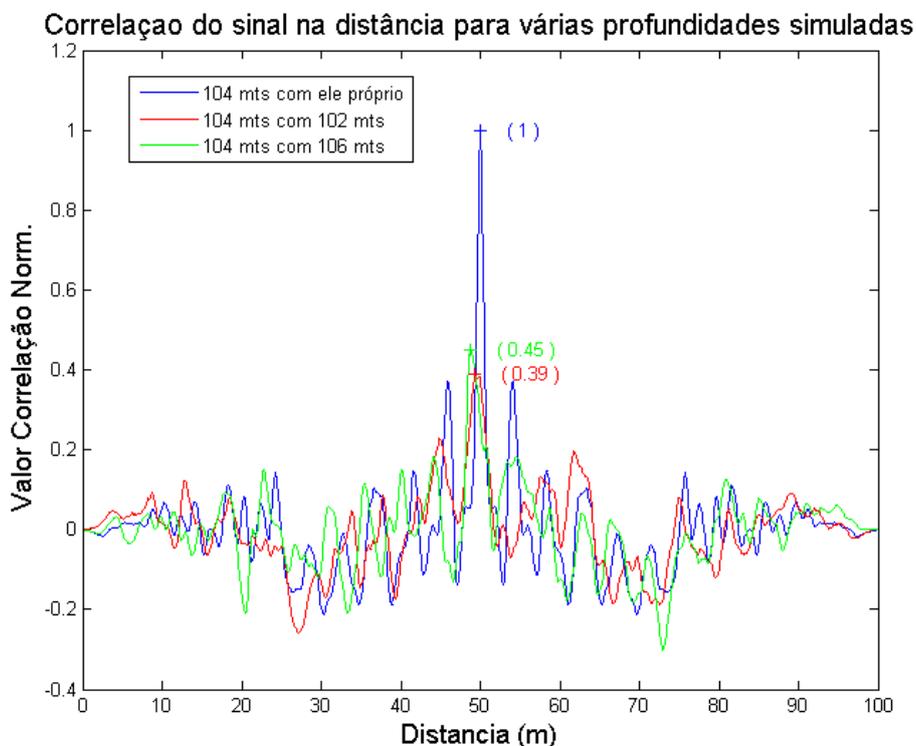


Figura 11 - Correlação do sinal na distância para várias profundidades simuladas

Como podemos ver através da figura 11, os pontos na distância onde ocorre o valor máximo da correlação, para as profundidades simuladas, estão muito próximo do ponto onde a correlação tem o valor unitário, ou seja na profundidade de 104 metros.

Correlação do sinal na profundidade para várias profundidades simuladas

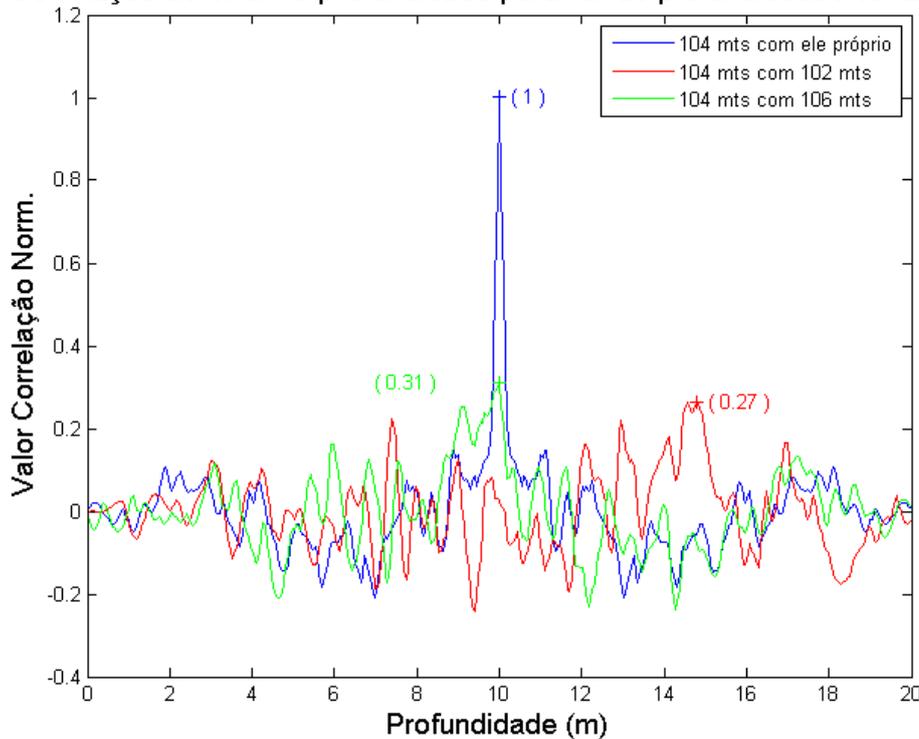


Figura 12 - Correlação do sinal na profundidade para várias profundidades simuladas

Para a figura 12 e efectuando a mesma análise, podemos concluir que o valor máximo da réplica de 104 metros com a de 102 metros, está um pouco afastada das curvas a azul e a verde.

Das duas figuras anteriores conclui-se ainda que, um desajuste na coluna de água, tem mais influência na profundidade do que na distância.

Como conclusão final, temos que o valor da correlação entre a profundidade de 104 metros e as outras profundidades modeladas, é baixo, o que permite concluir que o sistema é sensível a este parâmetro, especialmente quando consideramos os valores de correlação em função da profundidade.

CAPÍTULO IV

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Introdução

Durante a campanha MAKAI, basicamente foram realizadas três experiências[3], uma com o VSA parado (dia 20 de Setembro), uma outra com o VSA em movimento (dia 23 de Setembro) e ainda uma de "Field calibration" (dia 25 de Setembro). Para o presente trabalho iremos utilizar os dados recolhidos com o navio em movimento e com o navio parado. A primeira situação permitiu testar a equação (9) e determinar o azimute que o navio percorreu em relação à fonte acústica. Na segunda experiência, para além dos dados emitidos pelas fontes acústicas foram ainda recebidos pelo VSA algumas componentes de frequência baixa, que são designadas por ruído do navio, cuja localização iremos demonstrar mais à frente.

4.2 Azimute estimado com o navio em movimento

O VSA foi colocado a uma profundidade de 40 mts, num meio *range dependent*, conforme ilustra a figura 13. Apenas a fonte acústica TB2 estava a emitir sinais, fixada a uma profundidade de 89.5 mts. Nesta experiência o navio saiu junto à TB2 e andou cerca de 2.3 Km, num período que durou cerca de duas horas e trinta minutos. Os sinais emitidos pela fonte TB2 caracterizam-se por um conjunto de formas de onda que vão desde *lfm*, sinais multi-ton e sinais *m-sequence*, conforme ilustrado na figura 7.

Considerando a frequência de 8250 Hz presente nos tons emitidos e por forma a testar o beamforming, aplicou-se a equação (9) da

secção II e considerou-se uma duração de 2 segundos no bloco de dados lido, sendo possível estimar o azimute do navio em relação à fonte TB2.

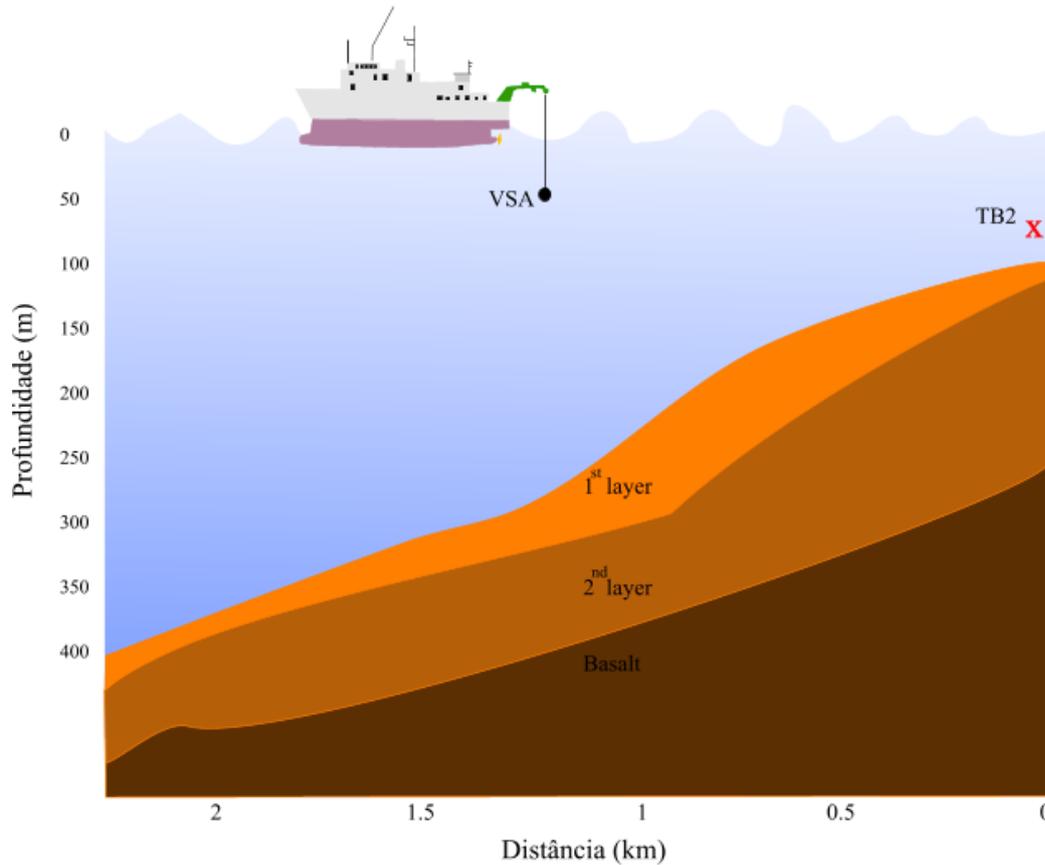


Figura 13 - Morfologia do meio

A figura 14 mostra a orientação do navio ao longo do período da experiência, considerando os sinais emitidos na frequência referida anteriormente.

Uma vez que só se pretendia testar a equação (9), que calcula o ângulo de azimute e de elevação, não foi feito qualquer alinhamento a um referencial ortogonal, sendo considerado apenas o ângulo de azimute, dado pelo *beamforming*.

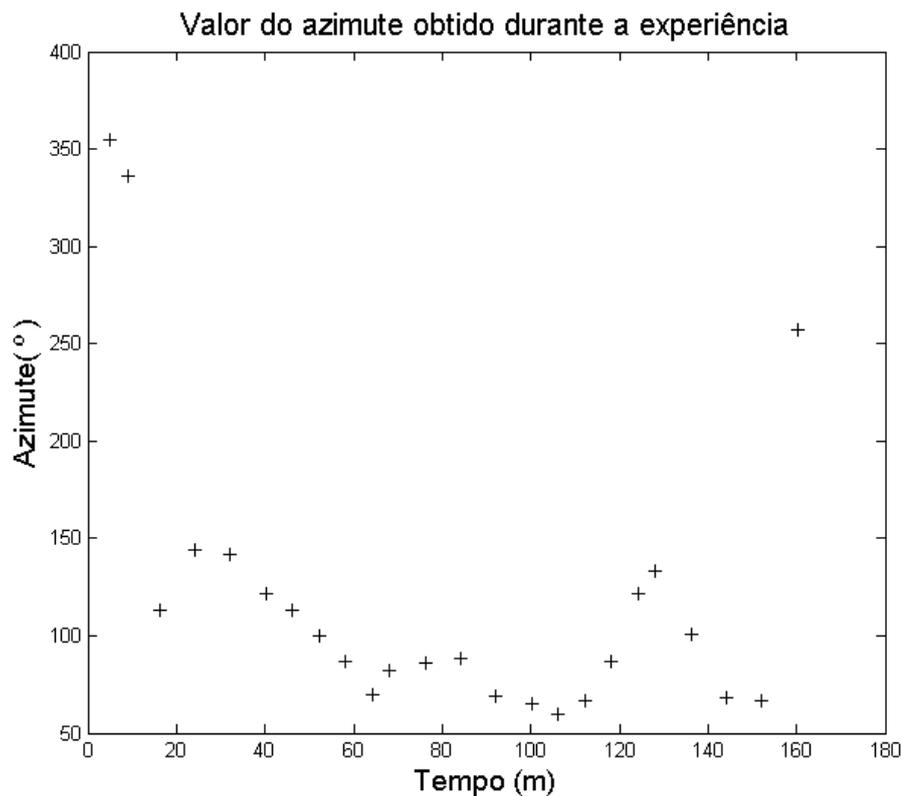


Figura 14 - Azimute estimado durante a experiência

Pela análise da figura anterior consegue-se ter uma ideia da orientação, no que concerne ao azimute, que o navio fez ao longo do tempo, podendo concluir-se que o trajecto não foi rectilíneo, existindo variação na posição do VSA. Este trajecto está em linha com os resultados obtidos em [23].

4.3 Análise do ruído de navio

Considerando os dados reais obtidos na experiência Makai, gravados durante a noite (dia 20 de Setembro), e aplicando um filtro passa baixo aos dados adquiridos, obtemos o espectrograma da figura 15, onde podemos verificar que se destacam algumas componentes de baixa frequência, que estão presentes em toda a duração dos dados recolhidos.

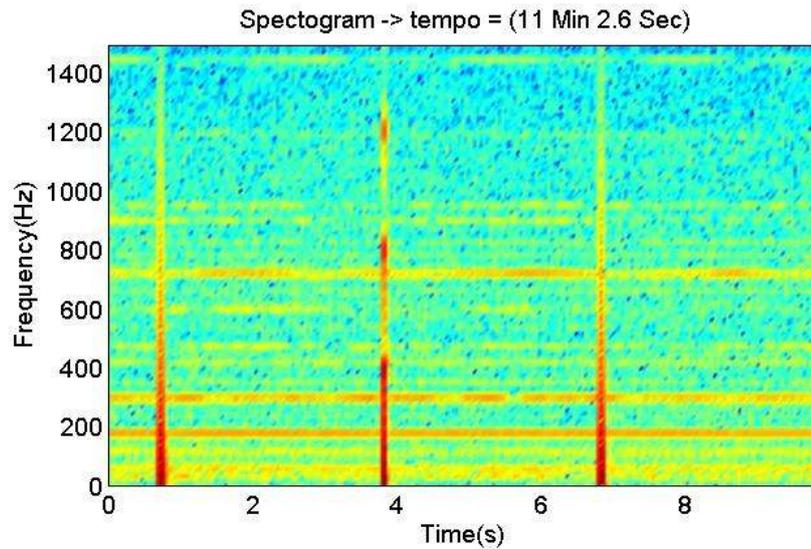


Figura 15 - Espectrograma de 10 segundos de dados

Os valores máximos dessas componentes podem ser visualizados na figura 16, que apresenta a densidade espectral da potência do canal de pressão do sensor vectorial, mais próximo da superfície do array, destacando-se a componente de 180 Hz.

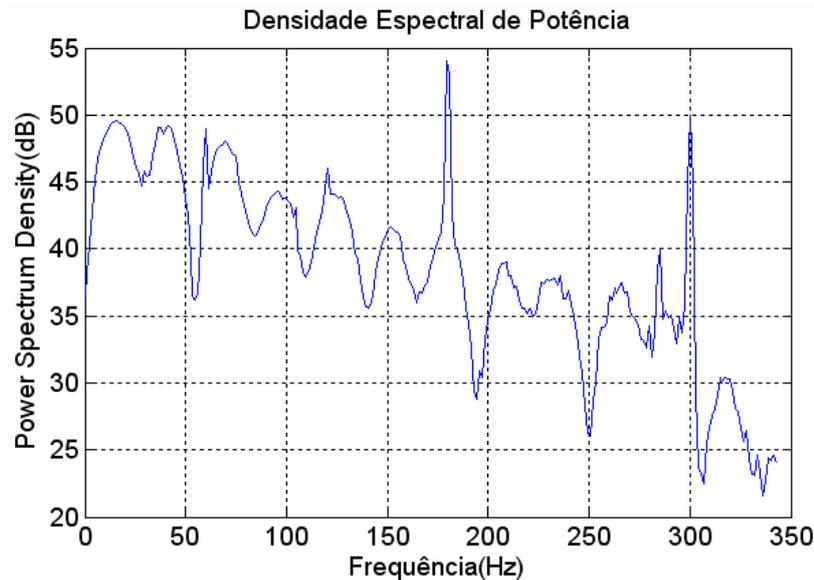


Figura 16 - Densidade espectral de potência do ruído do navio

4.3.1 Localização de ruído no espaço tridimensional

Considerando essa frequência e aplicando a equação (9), obtemos as figuras 17 e 18, que mostram os ângulos de elevação e de azimute, onde podemos verificar que os valores também são

estáveis ao longo do tempo, havendo apenas um instante que apresenta uma direcção diferente.

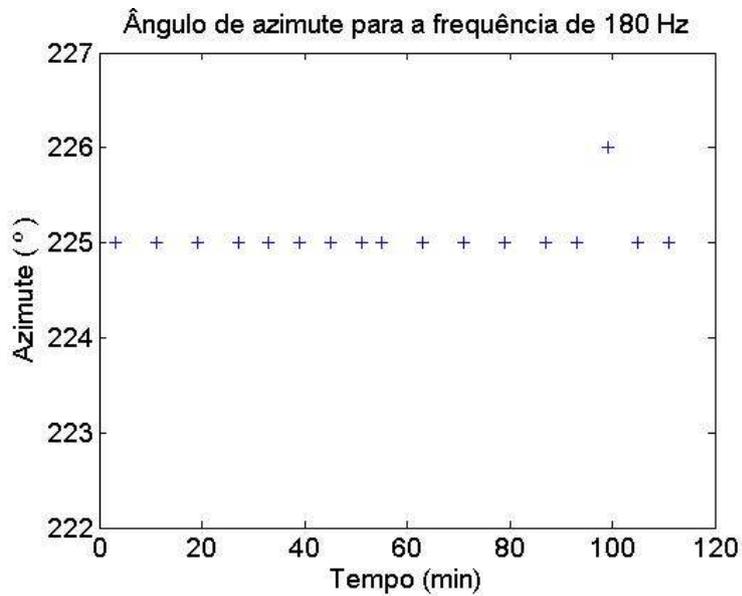


Figura 17 - Azimute estimado para a frequência de 180 hz

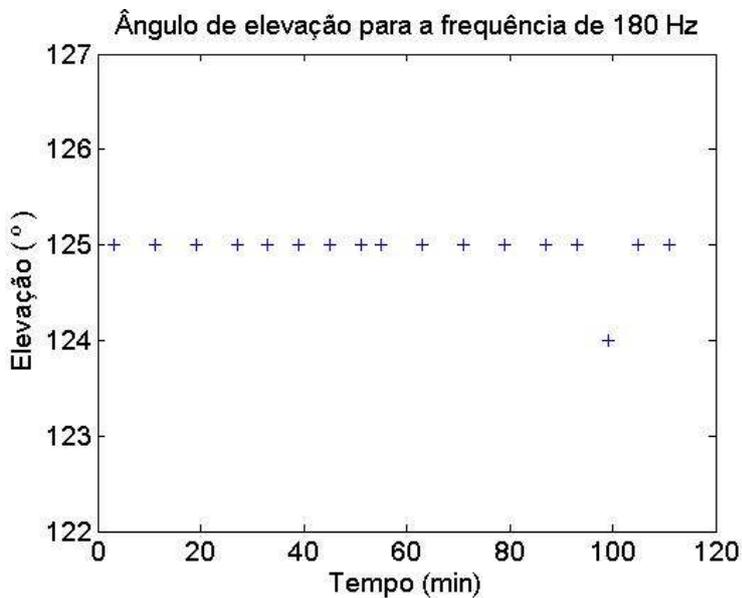


Figura 18 - Elevação estimada para a frequência de 180 hz

A figura 19 mostra a superfície de ambiguidade obtida pelo *beamformer* para determinar o azimute e a elevação da fonte acústica, ou seja, o ruído do navio considerado. Através da análise

dessa figura podemos ver que a onda acústica chega à antena vinda de um azimute de 225° e com uma elevação de 125° .

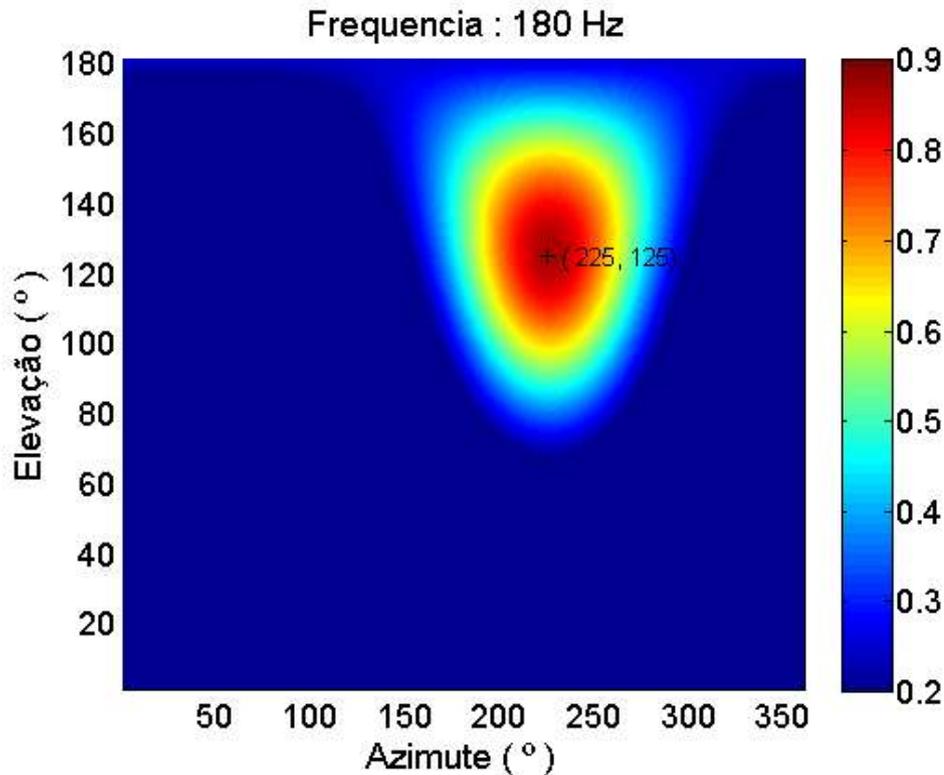


Figura 19 – Ângulo de azimute e elevação para a frequência de 180 hz

4.3.2 Localização do ruído apenas com a pressão acústica

Se considerarmos apenas a componente da pressão acústica medida em cada um dos sensores, e aplicando o algoritmo de *matched field*, podemos ver através da figura 20, que não é possível determinar a localização da componente de 180 Hz do ruído, uma vez que os valores de correlação são bastante altos, não se destacando qualquer pico ou valor que possamos considerar para uma estimativa da localização da referida fonte.

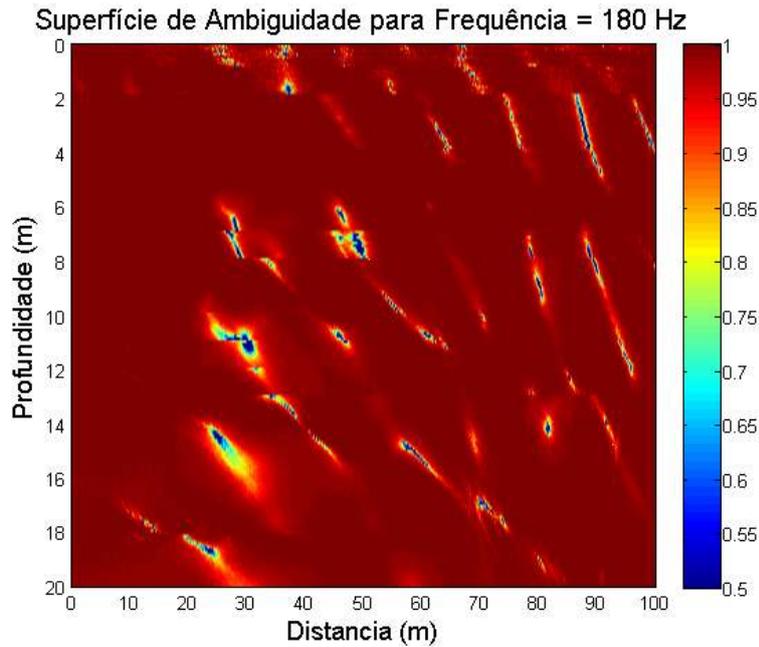


Figura 20 - Superfície de ambiguidade considerando a pressão acústica

As figuras 21 e 22, que derivam da figura anterior, são obtidas a partir dos valores máximos de correlação decompostos para a distância e para a profundidade, considerando só a pressão acústica. Nestas figuras podemos verificar que os valores da correlação assumem praticamente o valor unitário.

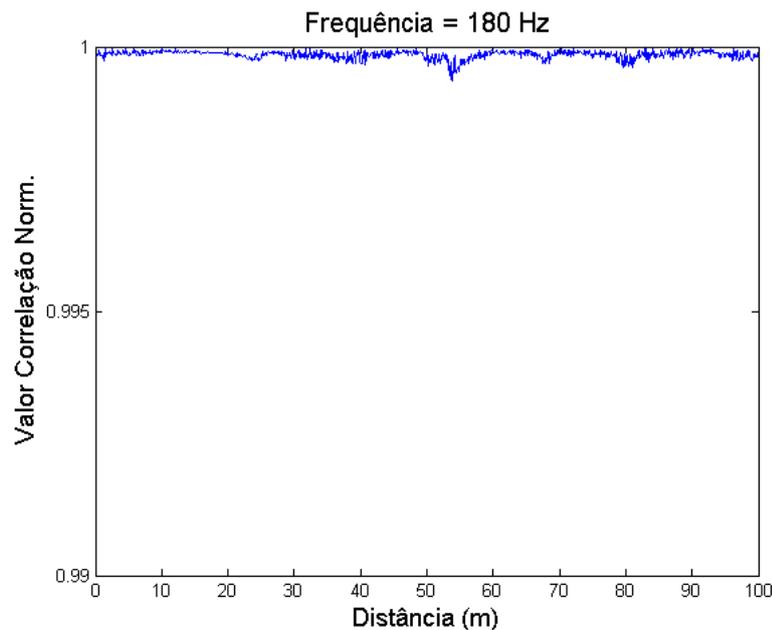


Figura 21 - Valores de correlação em função da distância

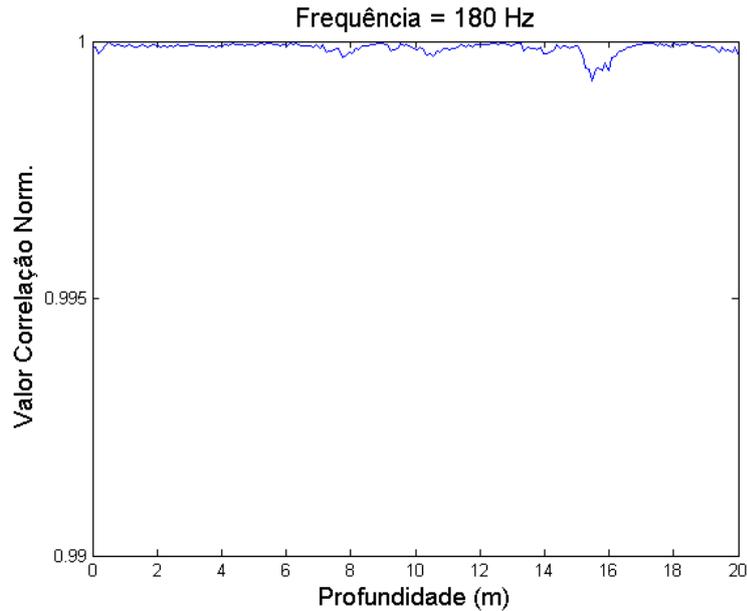


Figura 22 - Valores de correlação em função da profundidade

4.3.3 Localização do ruído com a pressão e a velocidade das partículas

Em vez de utilizarmos apenas a componente da pressão, se considerarmos as outras componentes da velocidade da partícula obtidas nos dados reais, e aplicando as técnicas de *matched field*, obtemos a superfície de ambiguidade da figura 23.

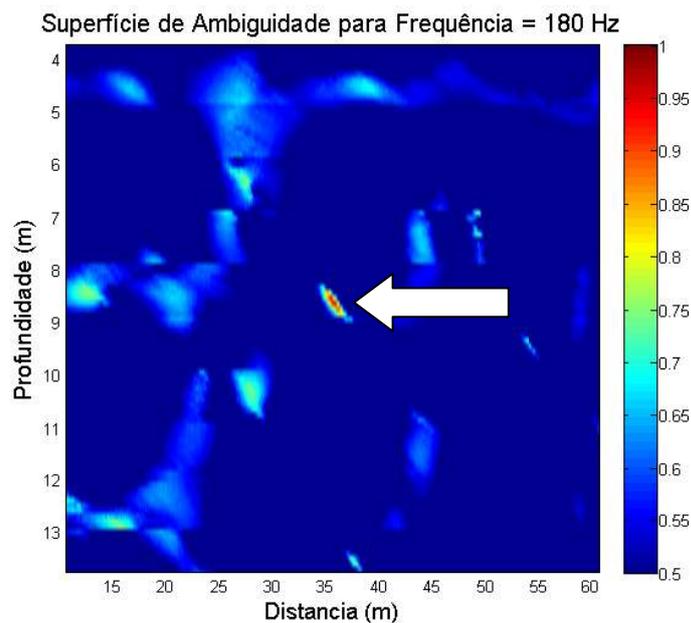


Figura 23 - Superfície de ambiguidade considerando a pressão e a velocidade das partículas

Verifica-se que, para a componente do ruído considerada, a localização da fonte sonora está bem definida.

As figuras 24 e 25 mostram o valor da correlação para a distância e para a profundidade, obtido a partir da figura 23. Conforme se pode constatar, destaca-se um valor máximo que permite obter uma localização da fonte acústica.

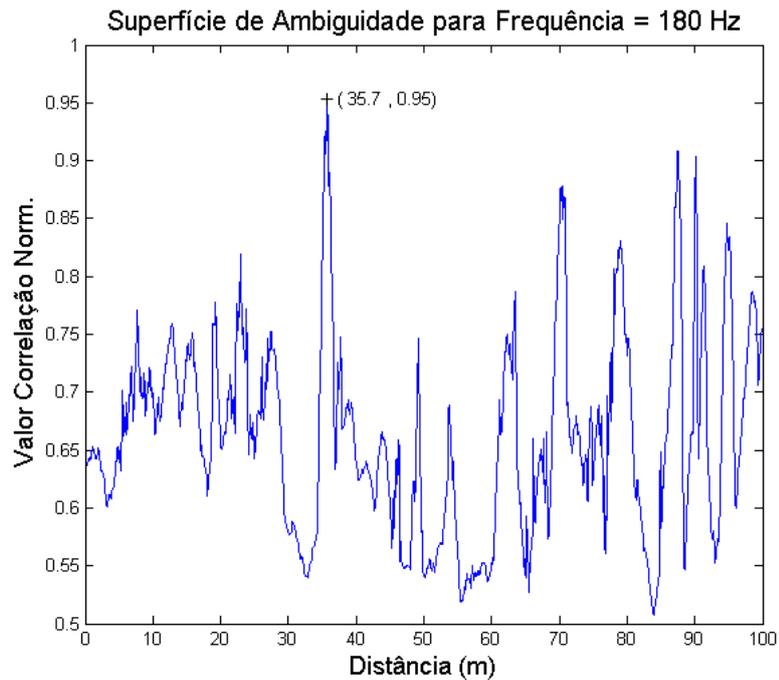


Figura 24 - Valor da correlação em função da distância

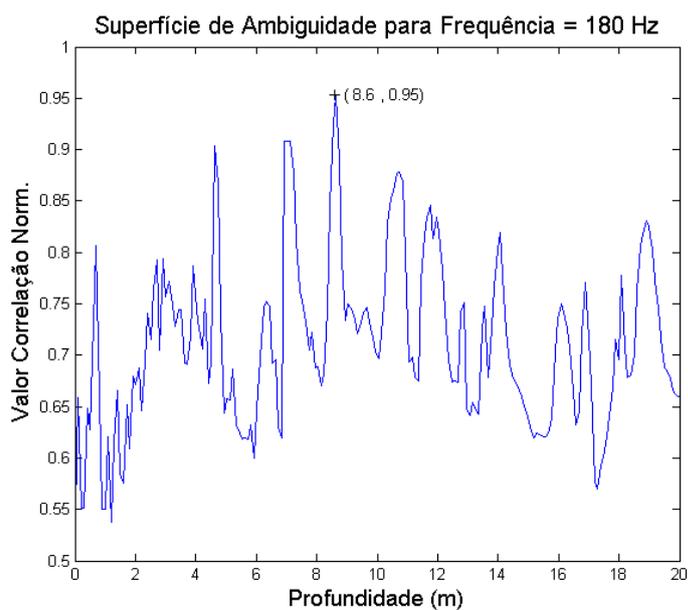


Figura 25 - Valor da correlação em função da profundidade

As figuras 26 e 27 mostram os valores da correlação, na distância e na profundidade, obtidos para a frequência de 180 hz para diferentes instantes temporais (11, 33, 51, 70, 93, 111) minutos.

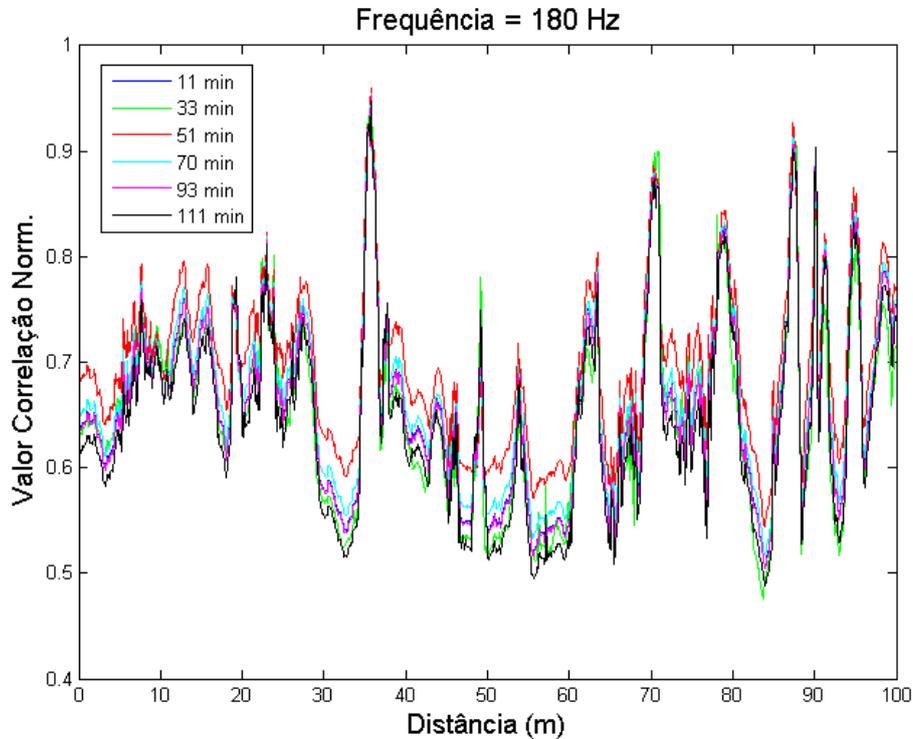


Figura 26 - Valor da correlação em função da distância nos vários instantes temporais

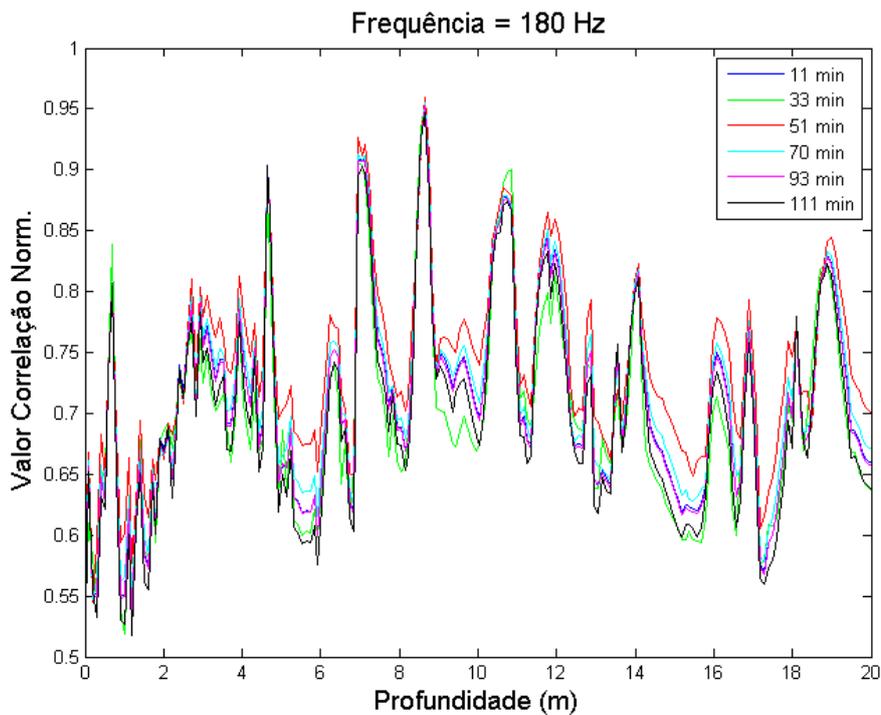


Figura 27 - Valor da correlação em função da profundidade nos vários instantes temporais

Constata-se, através das figuras anteriores, que os valores são estáveis ao longo do tempo, na profundidade e na distância.

Embora haja uma diferença entre o ângulo de elevação, obtido pelo *beamforming*, e aquele que resulta da distância e da profundidade encontrada, aplicando as técnicas de *matched field*, podemos dizer que o modelo utilizado consegue resolver a localização do ruído. Esta diferença entre o ângulo de elevação encontrado e o ângulo obtido através do *matched field*, poder-se-á dever ao facto de ocorrer *multipath*. Neste caso, o sinal na saída dos sensores é a média das réplicas que chegam à antena. Para além disto também podem existir algumas imperfeições no modelo, ou até mesmo aos parâmetros do meio considerados na tabela 1.

4.4 Análise da influência da profundidade modelada nos resultados

De seguida iremos analisar os resultados, considerando profundidades diferentes configuradas no modelo de dados e a uma frequência de 180 Hz. A profundidade configurada no modelo influencia os resultados, quando se aplicam as técnicas de *matched-field*, onde o processador vai comparar as semelhanças entre os campos do sinal observado e do sinal previsto. Para o mesmo instante considerado, se simularmos o meio para as profundidades de 102 e 106 metros, e aplicarmos a equação (11) podemos verificar, através das figuras 28 e 29, que os valores são um pouco diferentes dos obtidos para os 104 metros. Os resultados mostram o valor da correlação em função da distância e da profundidade, respectivamente.

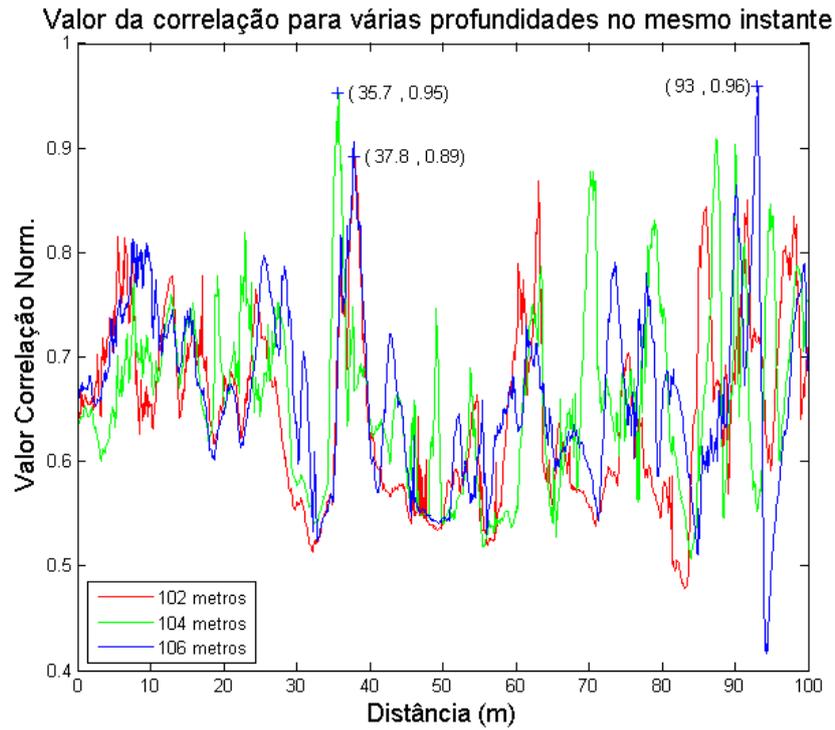


Figura 28 - Valor da correlação em função da distância para várias profundidades modeladas

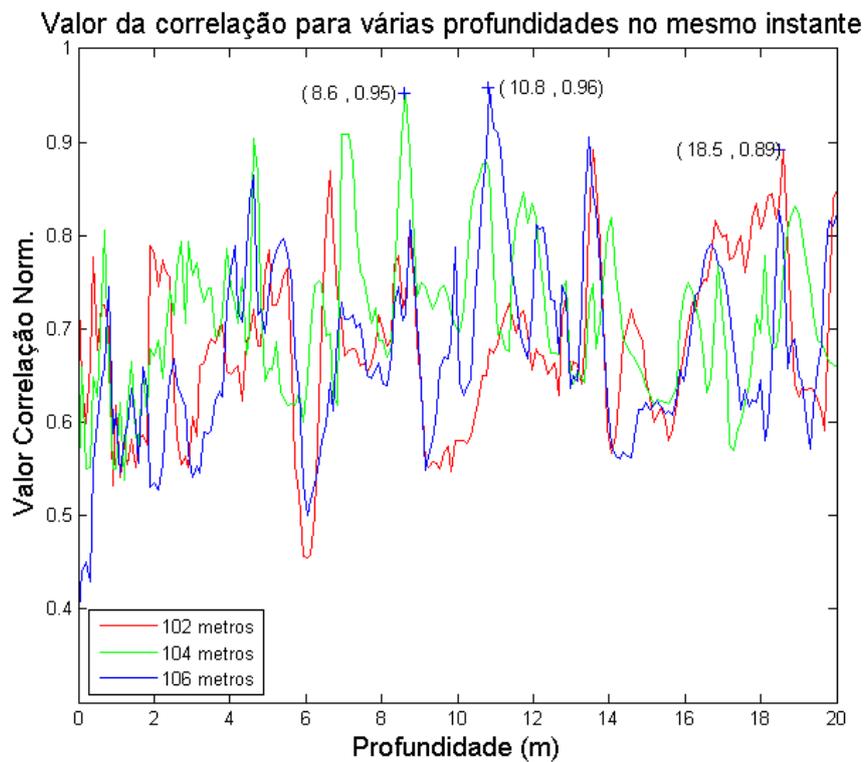


Figura 29 - Valor da correlação em função da profundidade para várias profundidades modeladas

Através da análise das figuras anteriores e uma vez que estamos a pesquisar pontos onde o valor da correlação é máximo para diferentes profundidades configuradas no modelo, podemos concluir que esta variável, tem influência nos resultados obtidos, conforme já foi referido nas simulações.

Analisando a figura 28, podemos verificar que o valor máximo de correlação é dado pela curva a azul, que representa a profundidade modelada de 106 metros. Este valor mostra uma localização do ruído num ponto fora da base do navio, enquanto as outras duas profundidades modeladas apresentam valores máximos mais coerentes na distância e mais reais para a localização do ruído.

Para aquele valor de correlação obtido num ponto fora do navio, o mesmo poder-se-á dever ao facto de ocorrer *multipath*. Neste caso, o sinal na saída dos sensores é a média das réplicas que chegam à antena. Como também já foi referido, podem existir algumas imperfeições no modelo, ou até mesmo aos parâmetros do meio considerados na tabela 1.

Considerando a figura 29, temos que os valores máximos de correlação são um pouco diferentes para as três profundidades consideradas, devendo-se isto às razões já referidas no parágrafo anterior. Nesta figura podemos verificar que a profundidade com o valor de correlação mais elevado é dado pela linha a azul que corresponde aos 106 metros.

Para esta frequência e conforme já vimos nas simulações, a profundidade configurada no modelo influencia bastante os resultados relativos à localização de fontes acústicas e tem mais influência quando estamos a considerar valores de correlação em função da profundidade.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1 Conclusões

Neste trabalho demonstrou-se que a capacidade de filtragem espacial intrínseca dos VSA, quando comparada com os tradicionais sensores de pressão acústica, é uma vantagem na detecção e na localização de fontes acústicas, conforme foi observado nos capítulos anteriores.

Utilizando um VSA com quatro elementos foi possível estimar as direcções azimutais e de elevação do ruído do navio. Conjugando o *beamformer* e o *match field*, foi possível obter a localização desse ruído no espaço através do azimute, distância e profundidade.

No presente trabalho foi também demonstrado que, com a utilização de um VSA, é possível determinar o ângulo de azimute de um navio em movimento, a partir de fontes acústicas de alta frequência.

Para além disso, estes sensores permitem ainda abrir novas possibilidades de estudo, tais como, o estudo dos parâmetros das camadas do fundo do mar (tipo e camadas sedimentares) e ainda as características da coluna de água (temperatura, salinidade).

5.2 Sugestões para futuras investigações

Por fim, como sugestão para estudos futuros, propõem-se as seguintes investigações:

- Considerando o caso do ruído aqui estudado, propõe-se o uso comparativo de outros algoritmos de determinação da localização da fonte acústica, a fim de explorar a melhor eficiência deste método na localização do ruído;
- Uma vez que as frequências mais altas são utilizadas na comunicação acústica e também por alguns mamíferos, sugere-se a análise e a exploração de algoritmos que permitam determinar a localização das fontes acústicas para estas frequências;
- Uma outra sugestão de investigação, e utilizando os mesmos dados (*overnight comms*), é explorar métodos de localização para ambientes *range-dependent*, isto é, onde haja variação de batimetria ao longo da distância (fonte-receptor);
- Por fim gostaria ainda de propor o desenvolvimento de métodos e algoritmos otimizados de forma a explorar a localização 3D em tempo real para a detecção de fontes acústicas no oceano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Paulo Santos**, "Vector Sensor Array Data Report Makai Ex 2005", Universidade do Algarve, 2008.
- [2] **Urick, Robert J.** "Princípios do Som Submarino", 3ª Edição. New York. McGraw-Hill, 1983.
- [3] **P. Santos, P. Felisberto, and P. Hursky**, "Source localization with vector sensor array during makai experiment," in 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results, Heraklion, Greece, June 25–29 2007.
- [4] **Orlando Rodriguez**, "General Description of the Bellhop ray tracing program", Physics Department, Signal Processing Laboratory - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade do Algarve.
- [5] **K.B Smith and F. Tappert**, Monterey-Miami Parabolic Equation model, desenvolvido na U.S. Naval Postgraduate School and Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sciences.
- [6] **James L. Buchanan, Robert P. Gilbert, Armand Wirgin, Yongzhi S. Xu,,** MARINE ACOUSTICS Direct and Inverse Problems - Society for Industrial and Applied Mathematics, 2004.
- [7] **Daniel R. Raichel**, The science applications of acoustics, 2nd Edition, 2006 Springer Science+Business Media, Inc.

- [8] **K. V. Mackenzie**, "Discussion of sea water sound-speed determinations". *J. Acoust. Soc. Am.*, 70:801–806, 1981.
- [9] **K. V. Mackenzie** "Nine term equation for sound speed in the ocean". *J. Acoust. Soc. Am.*, 70:807–812, 1981.
- [10] **Thomas D. Rossing** "Handbook of Acoustics". Springer 2007.
- [11] **José Roberto Motta da Silva**, "Detecção e localização acústica em águas rasas usando transformada wavelet contínua e outras técnicas espectrais", [Rio de Janeiro] 2005 XVI, 126p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.sC., Engenharia Elétrica, 2005).
- [12] **SIPLAB, FCT** - University of Algarve Campus de Gambelas
<http://www.siplab.fct.ualg.pt/models.shtml>.
- [13] **K. B. Smith and F. D. Tappert**, "UMPE: The University of Miami Parabolic Equation Model, Version 1.0," *Marine Physical Laboratory Technical Memo 432* (1993).
- [14] **R. H. Hardin and F. D. Tappert**, "Applications of the split-step Fourier method to the numerical solution of nonlinear and variable coefficient wave equations," *SIAM Rev.* 15, p. 423 (1973).
- [15] **K. B. Smith**, "Convergence, stability, and variability of shallow water acoustic predictions using a split-step Fourier parabolic equation model," *J. Comp. Acoust.* 9, No. 1, pp. 243-285 (2001).
- [16] **C. Huygens**, "Tractise on light" , Moscow-Leningrad (1935).

- [17] **Porter M.B. and Bucker H.P.** *Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. J. Acoust. Soc. America, 82(4):1349{1359, 1987.*
- [18] **Jensen F., Kuperman W., Porter M., and Schmidt H.** *Computational Ocean Acoustics. AIP Series in Modern Acoustics and Signal Processing, New York, 1994.*
- [19] **Paulo Santos, Paulo Felisberto and Sérgio M. Jesus,** "Vector Sensor Arrays in Underwater Acoustic Applications", *Institute for Systems and Robotics, University of Algarve.*
- [20] **A. Abdi and H. Guo.** "Signal Correlation Modeling in Acoustic Vector Sensor Arrays", *Department of Electrical and Computer Engineering, New Jersey Institute of Technology, 2008.*
- [21] **B. A. Cray, V. M. Evora, and A. H. Nuttall,** "Highly directional acoustic receivers," *J. Acoust. Soc. Am., vol. 113, 2003*
- [22] **T. B. Gabrielson,** "Design problems and limitations in vector sensors", in *Proc. Workshop Directional Acoustic Sensors (CDROM), New Port, RI, 2001.*
- [23] **Paulo Felisberto, Paulo Santos, Sérgio M. Jesus** "Tracking source azimuth using a single vector sensor", *Institute for Systems and Robotics, Universidade do Algarve.*

LISTA DE PUBLICAÇÕES

Comunicações

João, José Miguel Duarte, "Localização do ruído de navio com uma *antena de sensores vectoriais*", Jornadas do Mar, Alfeite (Portugal), Nov 2010;

Artigos

Paulo Santos, José João, Orlando C. Rodríguez, Paulo Felisberto and Sérgio M. Jesus, "*Geometric and Seabed parameter estimation using a Vector Sensor Array - Experimental results from Makai experiment 2005*", in Oceans 11, Santander (Espanha), Junho 2011;

Comunicações

José João, Paulo Felisberto "Localização do ruído de navio com uma antena de sensores vectoriais", Jornadas do Mar, Alfeite, Nov 2010;

Localização do ruído de navio com uma *antena de sensores vectoriais*

José João ¹, Paulo Felisberto ^{1,2}

¹ Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve

² Instituto de Sistemas e Robótica, Universidade do Algarve

Resumo

Tradicionalmente os sistemas de aquisição utilizados em acústica submarina são constituídos por antenas lineares de hidrofones, os quais medem a pressão acústica, uma grandeza escalar. Em aplicações típicas de sonar alguns sistemas têm sido concebidos utilizando antenas de sensores vectoriais ("*Vector Sensor Array*"-VSA), os quais além da pressão acústica medida pelos tradicionais hidrofones medem a velocidade das partículas sobre 3 eixos ortogonais. Uma vantagem dos sensores vectoriais é a sua capacidade de filtragem espacial intrínseca permitindo a resolução da ambiguidade esquerda-direita inerente às antenas lineares de hidrofones. A partir da campanha MakaiEx'05, demonstrou-se com dados reais que uma antena com poucos sensores (4), permite estimar a direcção de chegada (azimute e elevação) de sinais em várias bandas de frequência. Pode-se então conjecturar que utilizando uma antena de sensores vectoriais e aplicando métodos de "Match Field Processing" se consiga obter uma localização tridimensional de uma fonte acústica, onde para além do azimute se determine a distância e a profundidade. No presente trabalho estuda-se a aplicação desse conceito à localização tridimensional do ruído de um navio, aplicado aos dados da referida campanha MakaiEx'05. Uma vez que a localização da fonte é conseguida com antenas de poucos elementos, este tipo de sistemas poderá ser indicado para diferentes aplicações onde seja requisito a utilização de sistemas compactos, por exemplo na detecção de navios, submarinos, ou outro tipo de sons no oceano.

I - INTRODUÇÃO

A acústica submarina tem sido utilizada por animais marinhos, há milhões de anos. Alguns peixes e mamíferos que vivem no meio aquático, utilizam a acústica para detectarem cardumes de peixes ou predadores. Na actualidade, a acústica submarina é utilizada para diversas pesquisas destacando-se a sondagem do tipo de camadas de sedimento do fundo do mar, localização de depósitos minerais, obtenção da morfologia do fundo do oceano, caracterização de temperaturas da água, detecção e monitorização de terremotos subaquáticos e localização de fontes acústicas.

Mas voltando atrás, e falando um pouco de história, atrevemo-nos a dizer que a ciência da acústica submarina começou em 1490, quando Leonardo Da Vinci escreveu[1]:- "Se um navio parar no mar, e se se introduzir a extremidade de um tubo na água e colocar o ouvido na outra extremidade desse tubo, será possível ouvir outros navios a grande distância da sua posição."

A partir daqui estava aberto o caminho para o desenvolvimento da acústica submarina e o desenvolvimento de técnicas e componentes como o hidrofone ou mais recentemente, as antenas de sensores vectoriais.

A localização das fontes sonoras nos diversos meios aquáticos era feita, até há pouco tempo atrás, a partir de hidrofones tradicionais que apenas medem a pressão acústica da onda sonora. Desenvolvimentos tecnológicos recentes possibilitam a concepção de simples antenas de sensores vectoriais (3 sensores de medição da velocidade da partícula dispostos de forma ortogonal e um sensor de pressão omnidireccional)[2], os quais permitem determinar simultaneamente o azimute e a elevação de uma fonte sonora.

Com o objectivo de fazer vários estudos relacionados com a acústica submarina, foi promovida em Setembro do ano de 2005 uma experiência, na costa junto à ilha Kauai, pertencente às ilhas Hawaii,

em que foram emitidos um conjunto de sinais de várias frequências a partir de duas fontes sonoras controladas, os quais foram captados numa antena de sensores vectoriais composta por 4 elementos [3]. Para além desses sinais controlados, foi também captado ruído, nomeadamente ruído do navio. É esse ruído, que irá ser analisado e demonstrada a sua localização aplicando algumas técnicas de filtragem espacial descritas nos capítulos seguintes.

Uma vez que na localização das fontes sonoras se utilizam técnicas de *matched field*, é necessário ter um modelo computacional que faça a modelação da propagação das ondas acústicas no meio, sendo utilizado o modelo de modelo de *ray tracing* BELLHOP [4].

De uma forma simples, o *match field* é uma técnica que consiste na correlação entre os dados reais e o campo acústico calculado pelo modelo de propagação para uns determinados parâmetros. A localização da fonte é dada pelos parâmetros do modelo (distância da fonte, profundidade e azimute), onde a correlação é máxima

Este documento está organizado como se segue. A secção II mostra a teoria utilizada na realização deste trabalho, nomeadamente a caracterização das antenas de sensores vectoriais, as técnicas de *beamforming* e o *matched field* no processamento dos dados. Na secção III encontram-se as simulações do caso de estudo. A secção IV mostra os resultados obtidos na análise do ruído do navio existente nos dados reais, adquiridos durante a experiência Makai Ex 2005. Por fim na secção V são discutidos os resultados e tiradas as conclusões.

II – ESTRUTURA TEÓRICA

Nesta secção são descritas as antenas de sensores vectoriais e são apresentados alguns conceitos teóricos relacionados com o *beamforming* e *matched field processing*.

Localização do ruído de navio com uma *antena de sensores vectoriais*

A. Antenas de sensores vectoriais

Os sensores vectoriais para além da pressão medem as três componentes ortogonais da velocidade das partículas. Estes sensores tem vindo a ser utilizados em aplicações de SONAR e localização de fontes sonoras uma vez que permitem estimar o azimute e a elevação, resolvendo a ambiguidade esquerda-direita presente nas *antenas lineares* de hidrofones. Por outro lado e uma vez que as antenas de sensores vectoriais são mais direccionais do que um simples hidrofone, é possível a filtragem espacial do ruído acústico captado.

A figura 1 mostra um sensor vectorial onde podemos ver esquematizado as componentes da velocidade da partícula obtidas no sensor.

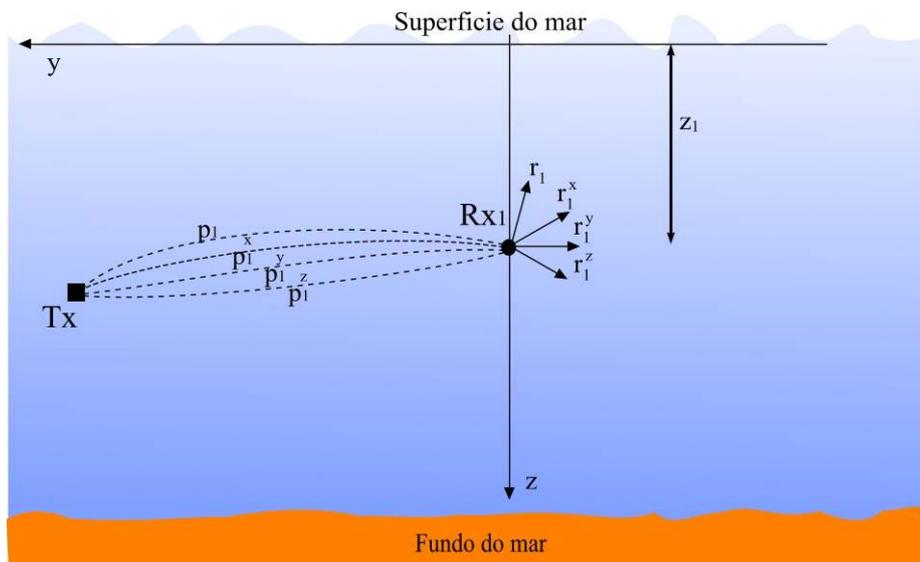


Figura 1[5] – Sistema composto por um transmissor de pressão e um sensor vectorial

Para explicar o funcionamento dos sensores vectoriais, vamos considerar um sistema com uma fonte acústica T_x e um sensor R_{x1} que estão posicionados a grande distância. O sensor está localizado na posição $y=0$ e a uma profundidade $z=z1$. Este sensor vectorial mede a pressão acústica assim como a componente x,y,z da velocidade da partícula em todos os pontos existentes entre a fonte e

Localização do ruído de navio com uma *antena de sensores vectoriais*

a antena. Considerando o exemplo da figura 1, iremos ter um canal de pressão e três canais de velocidade da partícula p_1^x , p_1^y , p_1^z , cuja grandeza é medida em (Newton/m²), representados nessa figura, por linhas a tracejado. Para definir p_1^x , p_1^y , p_1^z , necessitamos de definir os canais de velocidade v_1^x , v_1^y , v_1^z , em (m/s). As componentes da velocidade da partícula em x,y e z, na profundidade z_1 , considerando o lado onde são emitidas e à frequência f_0 , podem ser escritas de acordo com a seguinte equação:

$$v_1^x = -\frac{1}{j\rho_0\omega_0} \frac{\partial p_1}{\partial x} ; v_1^y = -\frac{1}{j\rho_0\omega_0} \frac{\partial p_1}{\partial y} ; v_1^z = -\frac{1}{j\rho_0\omega_0} \frac{\partial p_1}{\partial z}. \quad (1)$$

Na equação de cima também conhecida como equação de Euler, ρ_0 é a densidade do fluido (kg/m³) e $\omega_0=2\pi f_0$, representa a frequência em rad/s. A equação (1) apenas mostra que a velocidade numa determinada direcção é proporcional ao gradiente espacial da pressão naquela direcção. Para simplificar a notação, se multiplicarmos as componentes da velocidade da equação (1) por $-\rho_0 c$ que é impedância acústica do fluido, onde c representa a velocidade do som em m/s, iremos obter a velocidade da partícula associada a pressão, conforme mostra a equação (2).

$$p_1^x = -\rho_0 c v_1^x ; p_1^y = -\rho_0 c v_1^y ; p_1^z = -\rho_0 c v_1^z. \quad (2)$$

Considerando λ o comprimento de onda em (m) e o factor $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega_0}{c}$, como o número de onda em (rad/s), obtemos finalmente a expressão (3)

$$p_1^x = \frac{1}{jk} \frac{\partial p_1}{\partial x} ; p_1^y = \frac{1}{jk} \frac{\partial p_1}{\partial y} ; p_1^z = \frac{1}{jk} \frac{\partial p_1}{\partial z}. \quad (3)$$

Localização do ruído de navio com uma *antena de sensores vectoriais*

De acordo com a figura 1 cada sensor vectorial disponibiliza 4 sinais de saída. Por exemplo R_{x1} gera um sinal de pressão acústica r_1 e três sinais de velocidade da partícula r_1^x , r_1^y e r_1^z , medidos nas direcções de x,y e z. Se S representar o sinal emitido, então os sinais na saída do sensor, podem ser escritos conforme indica a expressão (4):

$$\begin{aligned}r_1 &= p_1 \oplus s + n_1, \\r_1^x &= p_1^x \oplus s + n_1^x, \\r_1^y &= p_1^y \oplus s + n_1^y, \\r_1^z &= p_1^z \oplus s + n_1^z,\end{aligned}\tag{4}$$

Na equação anterior o sinal \oplus representa a convolução e o n, o ruído de cada canal (x,y,z) para cada sensor. Para melhorar a performance do sistema, este tipo de sensores podem ser agrupados e configurados como *array's*.

Existem dois tipos de sensores vectoriais: os sensores de inércia e os de gradiente. Os sensores de inércia medem a velocidade ou a aceleração, respondendo ao movimento acústico da partícula, enquanto que os sensores de gradiente empregam uma aproximação para estimar a velocidade e a aceleração do campo acústico. Cada tipo de sensor tem seus próprios méritos e limitações [6]. Dependendo da aplicação, do custo do sistema, da precisão exigida, o projectista pode escolher o tipo e a tecnologia apropriadas à aplicação pretendida.

B. Beamforming com antenas de sensores vectoriais

Considere-se um ruído do navio como uma onda plana de determinada frequência. Para resolver a localização do ruído do navio com um *vector sensor array* (VSA), é aplicado um *beamformer*. Cada elemento sensor mede a pressão acústica e as três componentes da velocidade da partícula, que são combinadas utilizando um *weighting vector*. [2]

Localização do ruído de navio com uma *antena de sensores vectoriais*

Considerando que os dados reais foram obtidos por uma antena de 4 elementos, iremos ter um *weighting vector* W com dimensão $4N \times 1$, conforme a expressão (5).

$$W(\phi_s, \theta_s) = [W_1, W_2, \dots, W_n] \quad (5)$$

Este vector, irá utilizar a direcção dos cosenos, como peso para as componentes da velocidade da partícula e o valor unitário, para a pressão. Assim sendo, para o elemento i do array, o vector é dado pela expressão (6):

$$W_i = [W_{pi}, W_{xi}, W_{yi}, W_{zi}] = [1, \cos(\theta_s) \sin(\phi_s), \sin(\theta_s) \sin(\phi_s), \cos(\phi_s)] \times e^{(i \vec{k}_s \cdot \vec{r})} \quad (6)$$

para $i=1, \dots, N$, onde N é o número de elementos do VSA, K_s é o vector número de onda, correspondente à direcção procurada (ϕ_s, θ_s) e \vec{r} é a posição dos elementos da antena, conforme ilustra a figura 2. Os elementos da antena estão equiespaçados no eixo z , sendo que o primeiro está colocado na origem do sistema de coordenadas.

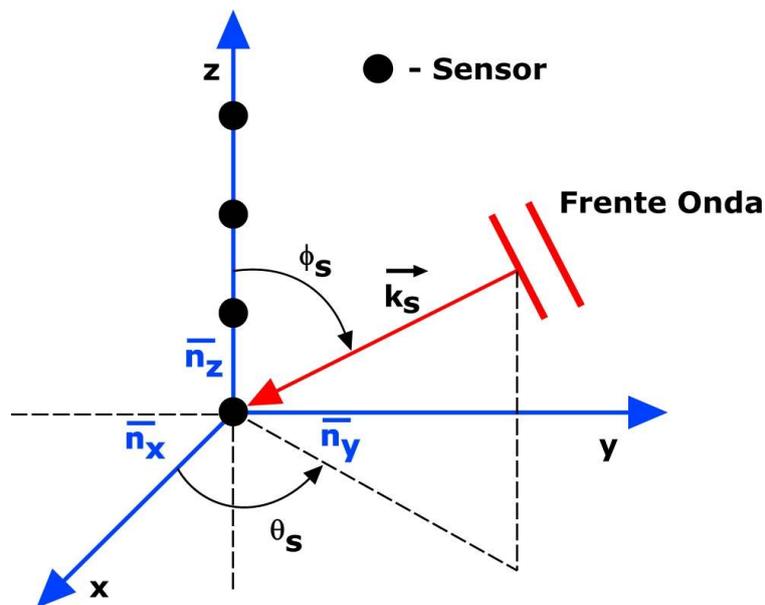


Figura 2[2] – Geometria de propagação da onda acústica na antena

Localização do ruído de navio com uma *antena de sensores vectoriais*

Para um VSA com N elementos, e considerando as equações anteriores, a direcção de chegada é dada pelos valores ϕ_s e θ_s que maximizam a expressão (7):

$$B(\phi_s, \theta_s, f) = W(\phi_s, \theta_s, f) \cdot R(f) \cdot W^T(\phi_s, \theta_s, f), \quad (7)$$

onde $R(f)$ é a matriz de correlação normalizada e estimada para cada frequência de interesse, calculada através da expressão (8):

$$R(f) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K A_k \cdot A_k^T, \quad (8)$$

sendo K, o número de janelas necessárias contidas no intervalo dos dados considerado, tendo em conta a frequência de amostragem e o número de pontos da FFT utilizada. O vector A_k representa o bin da FFT da frequência de interesse, na janela k que contém os 16 canais dos 4 VSA.

C. Matched Field Processing

Matched-field Processing (MFP) foi originalmente proposto para a localização de fontes sonoras, podendo também ser utilizado numa outra perspectiva, como forma de estimar outros parâmetros, por exemplo os do fundo do mar. Devido às potencialidades que os VSA têm de fornecer informação direccional e da capacidade de filtragem espacial intrínseca, a utilização dos mesmos podem trazer muitas vantagens quando utilizamos o MFP.

Esta técnica foi utilizada para o cálculo da superfície de ambiguidade, considerando o processador de *Bartlett*, sendo este o mais popular e o mais simples de implementar. Este processador executa a correlação linear entre o campo observado e o campo previsto a partir do modelo de propagação, sendo o campo observado, os dados

recolhidos pelo VSA e o previsto, os dados gerados no modelo de propagação, configurado com os parâmetros do meio.

Este processador foi adaptado aos quatro canais de cada VSA e permite comparar as semelhanças entre os campos do sinal observado e do sinal previsto.

O campo previsto foi gerado pelo modelo BELLHOP[4], que é um modelo de raios desenvolvido para modelar ondas acústicas bidimensionais em meios aquáticos. Este modelo calcula os valores da pressão acústica e também as componentes horizontal e vertical da velocidade da partícula.

Uma vez que este modelo não disponibiliza a velocidade da partícula segundo as direcções tridimensionais, as componentes v_x e v_y são calculadas projectando a componente horizontal v_r na direcção azimutal da fonte acústica estimada.

A superfície de ambiguidade, isto é o valor que o processador toma para cada realização dos parâmetros no intervalo de busca é dada através da expressão (9),

$$P_{BT}(\theta, f) = W_{md}^T(\theta, f) \times R(f) \times W_{md}(\theta, f) \quad (9)$$

onde W_{md} é o vector dos dados obtidos a partir do modelo à frequência f , enquanto que $R(f)$ é a matriz de correlação estimada para o campo acústico observado à frequência f .

III - SIMULAÇÕES

Para se poder simular os métodos apresentados na secção anterior e ter uma ideia da sua performance nos dados reais, iremos descrever agora as características do meio aquático assim como do modelo de raios utilizado na simulação. Os dados reais foram adquiridos durante a experiência Makai Ex 2005 que teve lugar entre os dias 15

Localização do ruído de navio com uma *antena de sensores vectoriais*

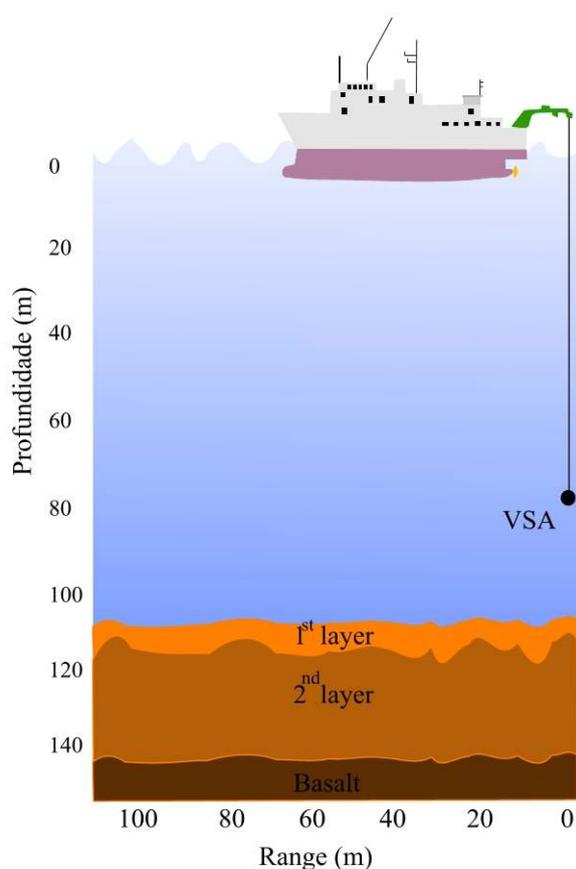


Figura 3 – Modelo do meio em estudo

de Setembro e o dia 02 de Outubro, na costa do Hawai.

Estes dados foram recolhidos através de 4 VSA colocados a uma profundidade de 79.6 mts (sensor mais próximo da superfície) e com espaçamento de 10 cm, colocados num meio com cerca de 104 metros de coluna de água, conforme mostra a figura 3. Este meio apresenta um perfil da velocidade do som (SSP) conforme a figura 4. Para a simulação dos tempos de chegada da onda e das amplitudes, foi utilizado o modelo BELLHOP,

considerando-se os parâmetros do meio indicados na tabela 1. O meio foi discretizado em distância e profundidade com um passo de 10 cm. Considerando que se procurava a localização do ruído característico do navio, foi feita uma pesquisa de valores entre os 0-20 metros de profundidade e os 0-100 metros na distância.

Parâmetro	Areia (1.ª camada)	Areia (2.ª camada)	Basalto
Espessura	0.175	45.825	-
Velocidade compressional C_p	1565	1700	2330
Velocidade tesoura C_s (shear speed)	67	700	1000
Densidade	1.5	2.1	2.1
Atenuação compressional α_p	0.6	0.1	0.1
Atenuação tesoura α_s (Shear attenuation)	1.0	0.2	0.2

Tabela 1- Parâmetros do meio

Localização do ruído de navio com uma *antena de sensores vectoriais*

O Bellhop é um modelo de raios que calcula a velocidade das partículas, tendo sido concebido para gerar feixes acústicos a duas dimensões. De seguida iremos analisar uma simulação com uma posição conhecida da fonte acústica para testar o método. Por exemplo se considerarmos a fonte acústica colocada a 15 metros de profundidade e a 58

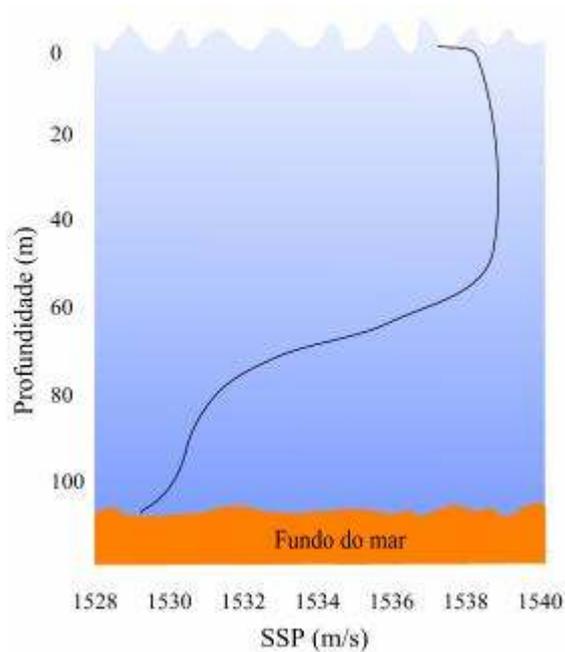


Figura 4 – perfil da velocidade do meio

de distância e aplicando as formulas de *matched field*, obtemos então a superfície de ambiguidade da figura 5. A imagem permite identificar o origem da fonte, havendo outros pontos possíveis de localização, mas com uma menor correlação.

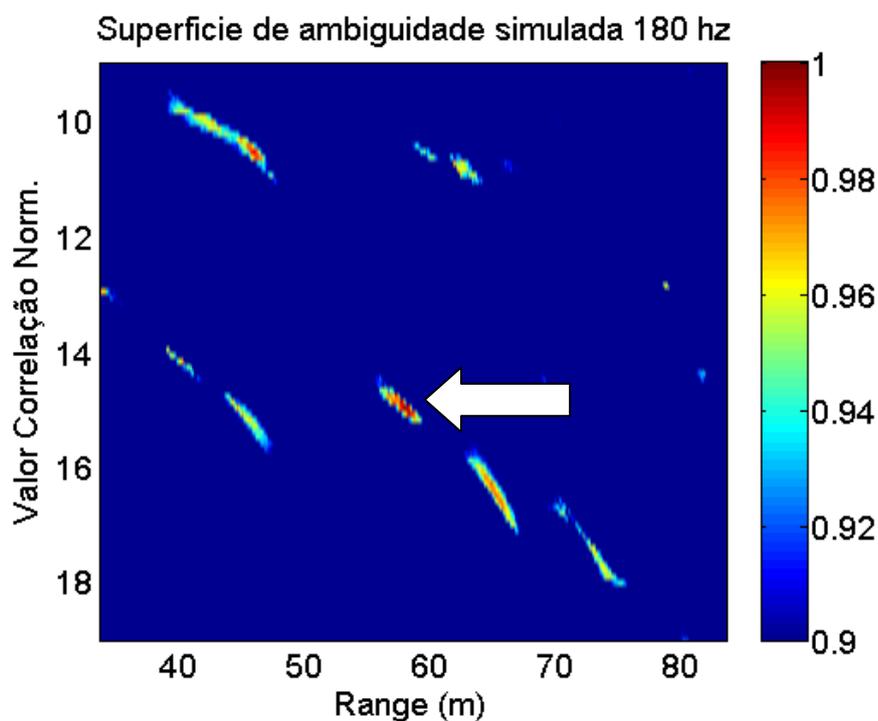


Figura 5 – Superfície de ambiguidade obtida na simulação

IV – ANÁLISE DOS DADOS REAIS

Considerando os dados reais obtidos na experiência Makai e o instante temporal inicial de 11,26 minutos, obtemos o espectrograma da figura 6, onde podemos ver que se destacam algumas componentes de baixa frequência, que estão presentes em toda a duração dos dados recolhidos.

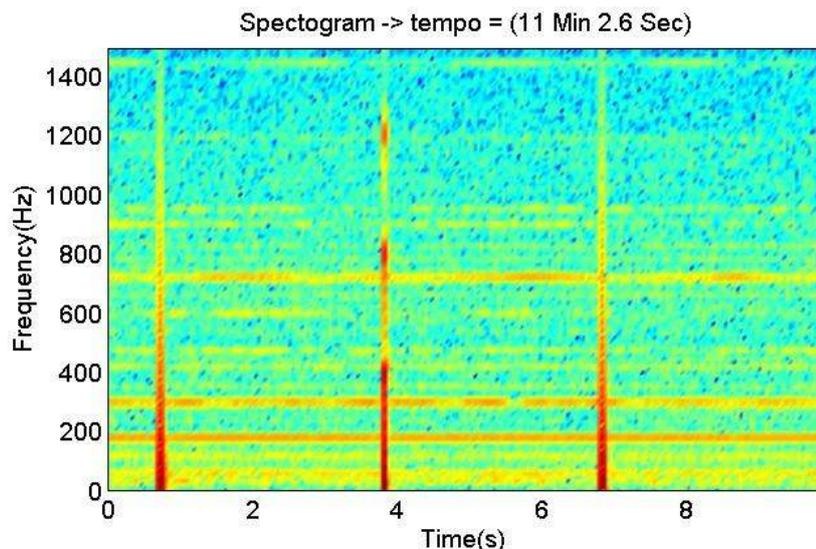


Figura 6 – Espectrograma de 10 segundos de dados

Os valores máximos dessas componentes podem ser visualizados na figura 7, que apresenta a densidade espectral da potência do canal de pressão do hidrofone 1 do VSA, destacando-se a frequência de 180 Hz.

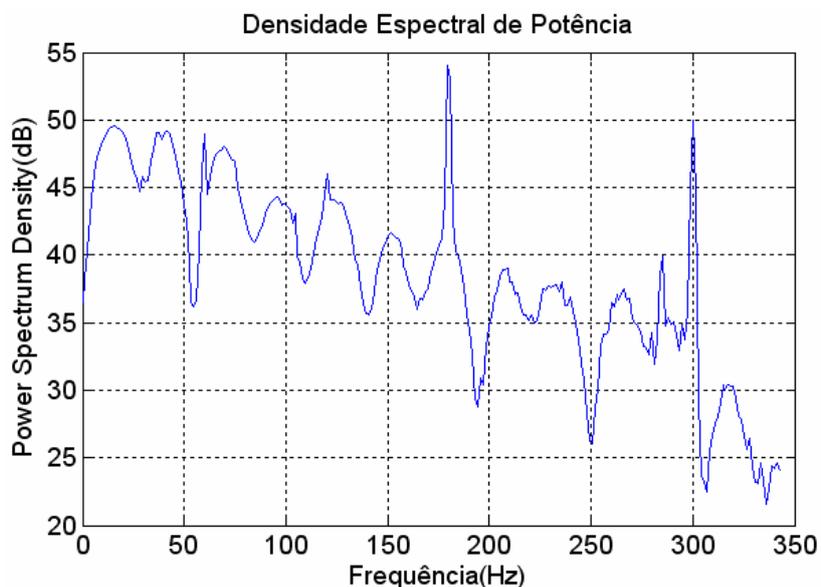


Figura 7 – Energia das componentes da frequência

Localização do ruído de navio com uma *antena de sensores vectoriais*

Considerando essa frequência e analisando os dados recolhidos pelo VSA, temos que os valores espectrais se mantêm estáveis ao longo do tempo.

As figuras 8 e 9 mostram os ângulos de elevação e de azimute para a frequência de interesse obtidos pela aplicação de (7), onde podemos verificar que os valores também são estáveis ao longo do tempo havendo apenas um instante que apresenta uma direcção diferente.

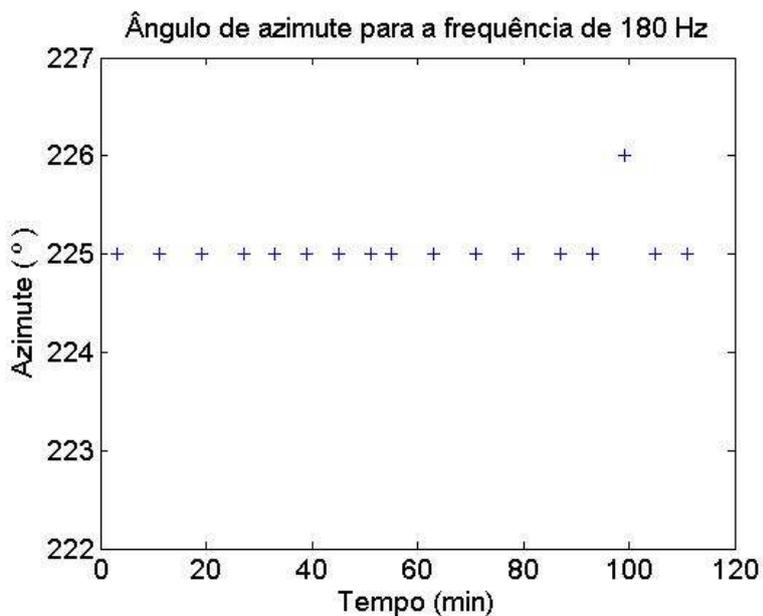


Figura 8 - Ângulo de azimute obtido para a frequência de 180 hz

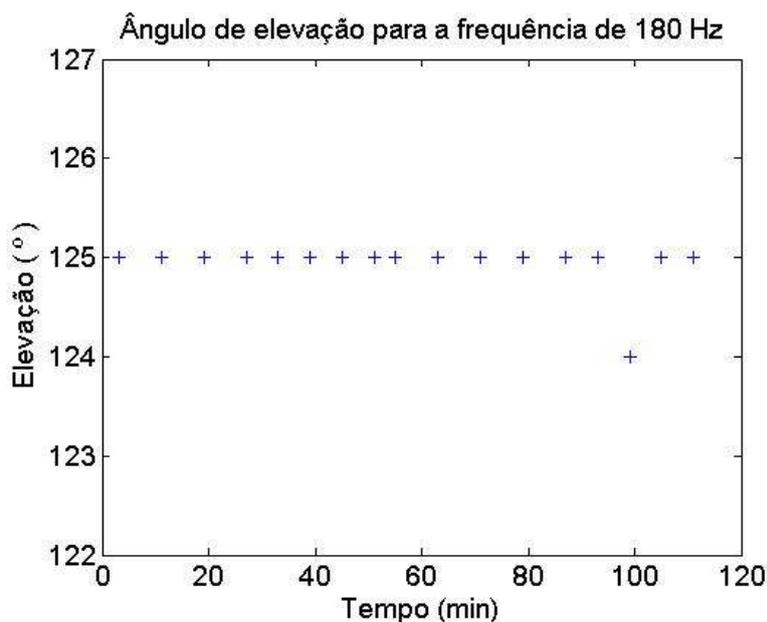


Figura 9 - Ângulo de elevação obtido para a frequência de 180 hz

Localização do ruído de navio com uma *antena de sensores vectoriais*

A figura 10 mostra a superfície de ambiguidade obtida pelo *beamformer* para determinar o azimute e a elevação da fonte acústica. Através da análise da figura podemos, ver que a onda acústica chega à antena vinda de um azimute de 225° e com uma elevação de 125° .

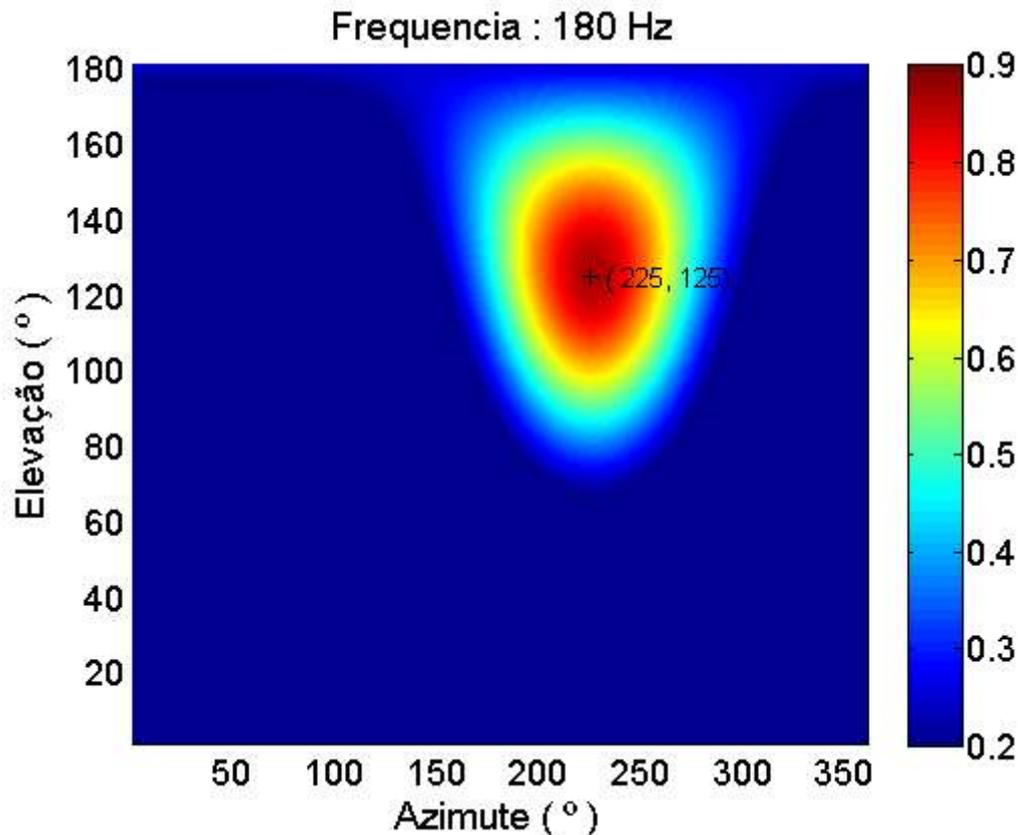


Figura 10 – Superfície de ambiguidade para a frequência de 180 Hz

As vantagens em utilizar sensores vectoriais em relação a simples hidrofones, que só meçam a pressão acústica, são bastantes. Por exemplo um *array* vertical de hidrofones só poderia resolver a elevação na figura anterior. Outra vantagem, no caso de utilização de *matched field*, podemos observar nas figuras seguintes. Se considerarmos apenas a componente da pressão acústica medida em cada um dos sensores, podemos ver através da figura 11, que não é possível determinar a localização da componente de 180 Hz do ruído, uma vez que os valores de correlação são bastante altos, não se destacando qualquer pico.

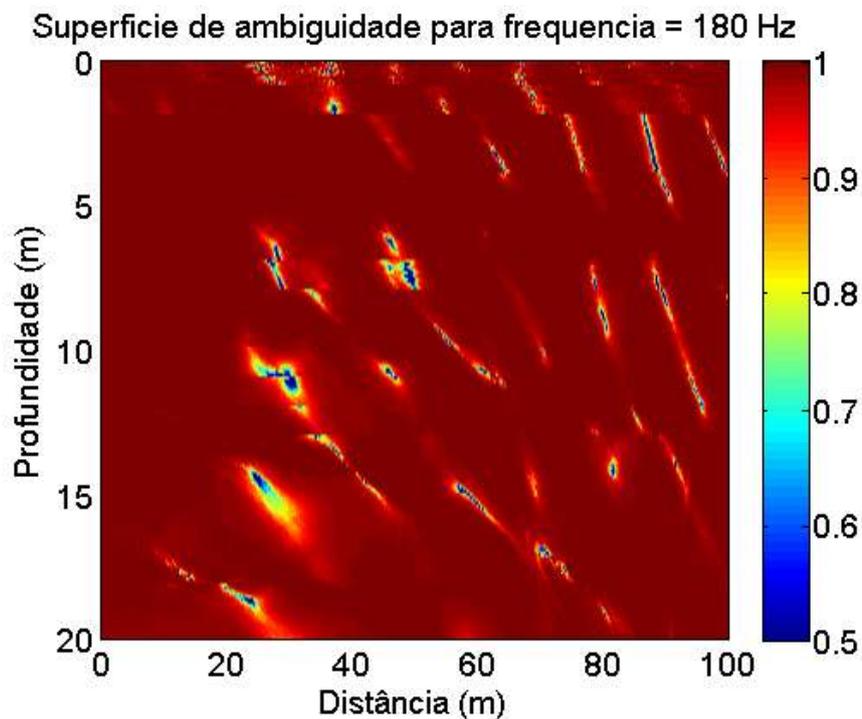


Figura 11 – Superfície de ambiguidade considerando a pressão acústica

As figuras 12 e 13, que derivam da figura anterior mostram os valores da correlação considerando só a pressão acústica na distância e na profundidade, respectivamente.

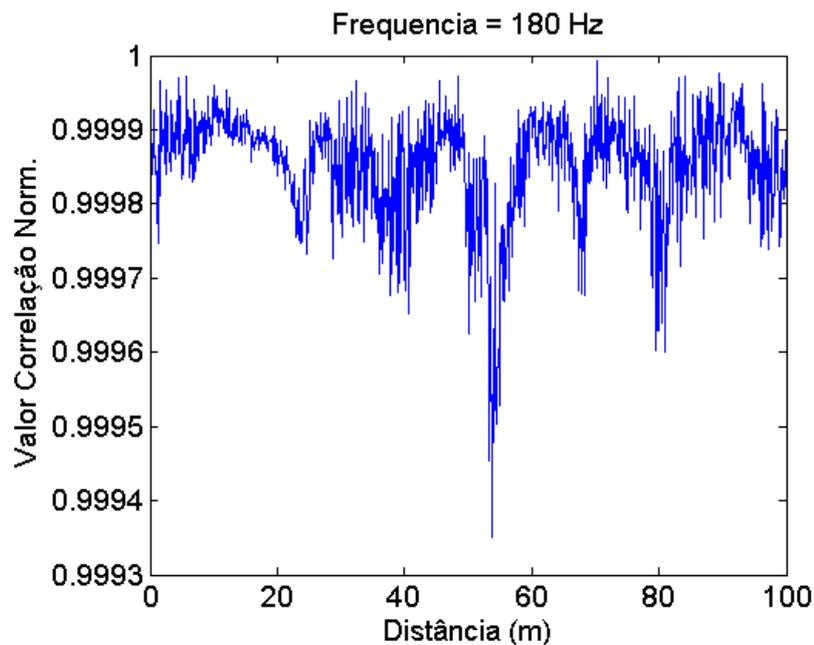


Figura 12 – Valores de correlação medidos para a distância

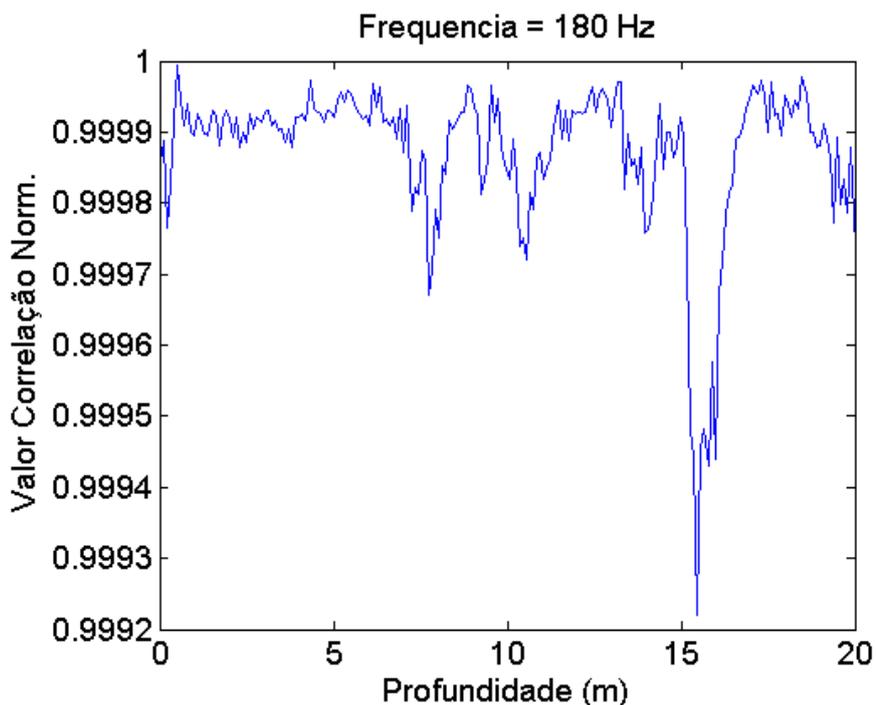


Figura 13 – Valores de correlação medidos para a distância

Em vez de utilizarmos apenas componente da pressão, se considerarmos as outras componentes da velocidade da partícula, obtidas nos dados reais e aplicando as técnicas de *matched field*, obtemos a superfície de ambiguidade da figura 14.

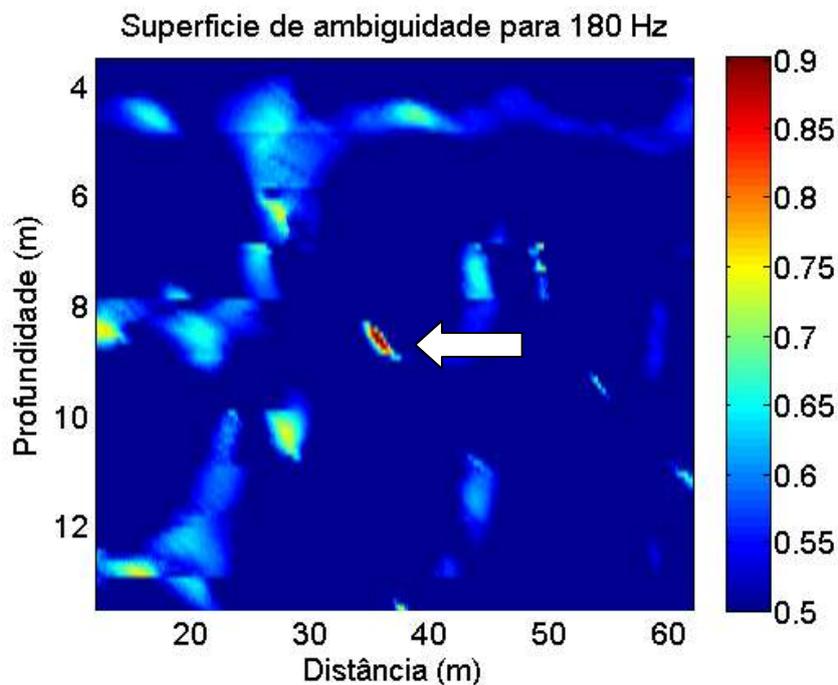


Figura 14 – Superfície de ambiguidade para a frequência de 180 Hz

Localização do ruído de navio com uma *antena de sensores vectoriais*

Podemos ver que, para a componente do ruído considerada, a localização da fonte sonora está bem definida.

As figuras 14 e 15 mostram o valor da correlação para a distância e para a profundidade, respectivamente e conforme podemos ver, destaca-se um valor máximo, que permite obter uma localização da fonte acústica.

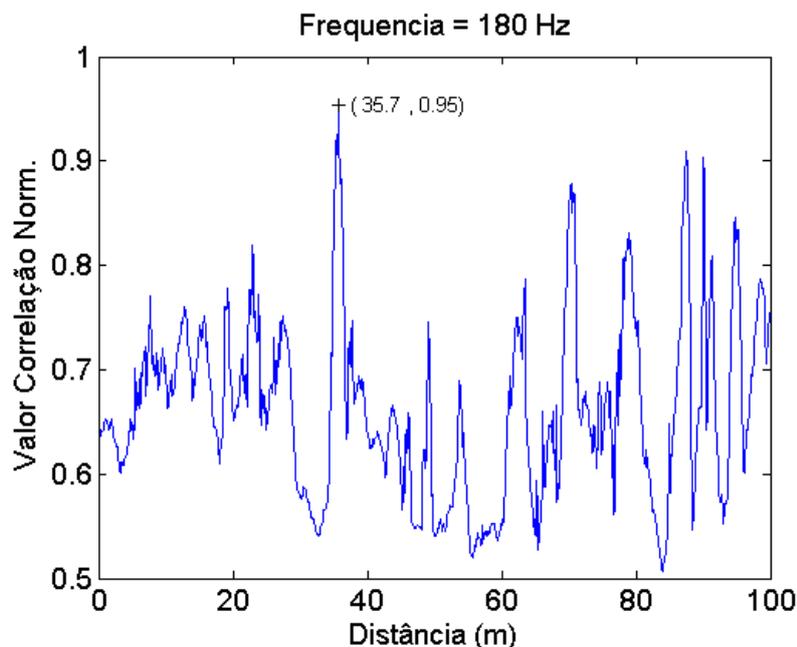


Figura 14 - Valor da correlação na distância para a frequência de 180 Hz

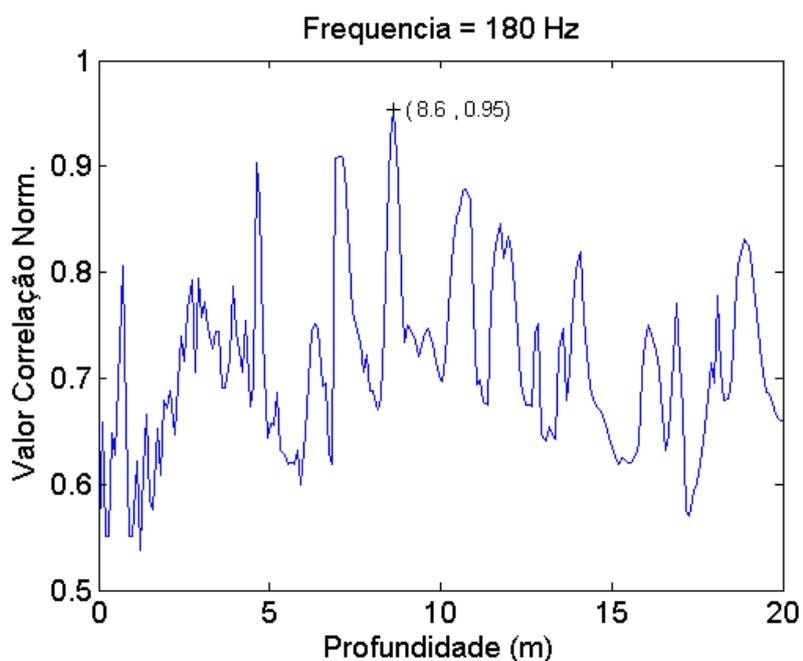


Figura 15 - Valor da correlação na profundidade para a frequência de 180 Hz

Localização do ruído de navio com uma *antena de sensores vectoriais*

As figuras 16 e 17 mostram os valores da correlação, na distância e na profundidade, obtidos para a frequência de 180 hz para vários instantes temporais diferentes.

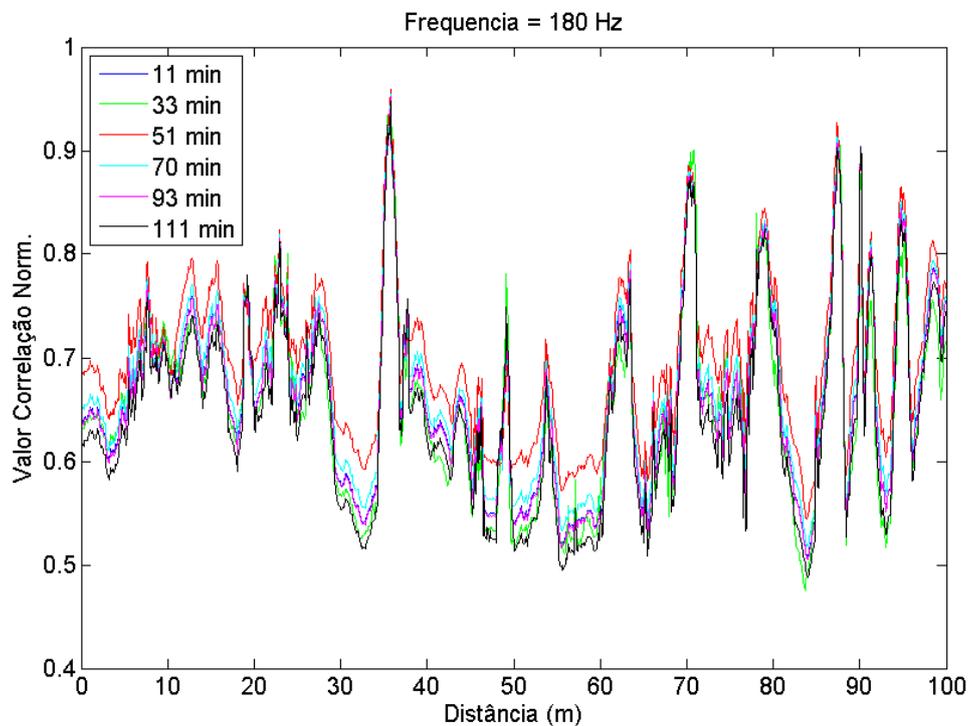


Figura 16 – Valor da correlação na distância para vários instantes temporais para 180 Hz

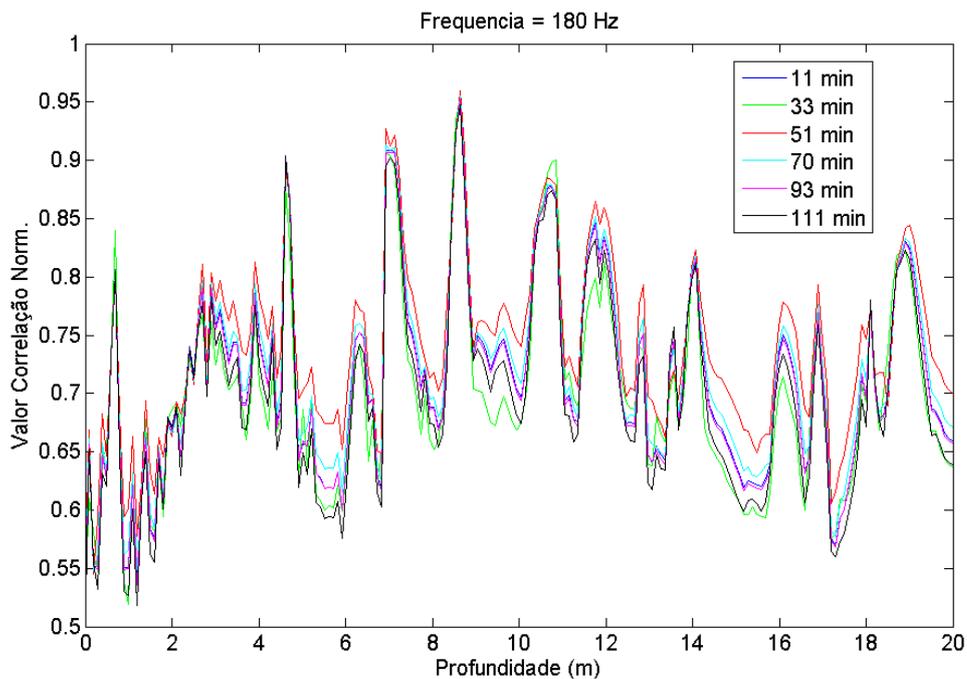


Figura 17 – Valor da correlação na profundidade para vários instantes temporais para 180 Hz

Podemos ver, através das figuras anteriores que os valores são estáveis ao longo do tempo, na profundidade e na distância.

Embora haja uma ligeira diferença entre o ângulo de elevação obtido pelo *beamformig* e aquele que resulta da distância e profundidade encontrado aplicando as técnicas de *matched field*, podemos dizer que o modelo utilizado consegue resolver a localização do ruído. Esta pequena diferença entre o ângulo de elevação encontrado e o ângulo obtido através do *matched field*, poder-se-á dever a algumas imperfeições no modelo, ou até mesmo nos parâmetros do meio considerados na tabela 1.

V CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu demonstrar que utilizando um VSA com 4 elementos é possível obter as direcções azimutais e de elevação das ondas acústicas de baixa frequência. Conjugando o beamformer de ondas planas com o *match field* foi possível obter a localização do ruído do navio no espaço através do azimute, distância e profundidade.

A capacidade de filtragem espacial intrínseca dos VSA quando comparada com os tradicionais sensores de pressão acústica é uma vantagem na detecção e localização de fontes acústicas, conforme podemos ver, nos capítulos anteriores.

Estes sensores permitem ainda abrir novas possibilidades de estudo, tais como o estudo dos parâmetros das camadas do fundo do mar (tipo e camadas sedimentares) assim como, das características da coluna de água (temperatura, salinidade).

AGRADECIMENTOS:

Os autores gostariam de agradecer a Michael Porter o cientista que coordenou toda a experiência Makai e aos restantes elementos da HLS research. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projecto SENSOCEAN financiado pela Fundação da Ciência e Tecnologia (FCT) (PTDC/EEA-ELC/104561/2008).

REFERÊNCIAS

- [1] **Urick, Robert J.** "Princípios do Som Submarino", 3ª Edição. New York. McGraw-Hill, 1983.

- [2] **P. Santos, P. Felisberto, and P. Hursky,** "Source localization with vector sensor array during makai experiment," in *2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results, Heraklion, Greece, June 25–29 2007.*

- [3] **Paulo Santos,** "Vector Sensor Array Data Report Makai Ex 2005", *Universidade do Algarve, 2008.*

- [4] **Orlando Rodriguez,** *modelo de raios desenvolvido na UALG, Physics Department, Signal Processing Laboratory - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade do Algarve.*

- [5] **A. Abdi and H. Guo.** "Signal Correlation Modeling in Acoustic Vector Sensor Arrays", *Department of Electrical and Computer Engineering, New Jersey Institute of Technology, 2008.*

- [6] **T. B. Gabrielson**, "Design problems and limitations in vector sensors," in *Proc. Workshop Directional Acoustic Sensors (CDROM), New Port, RI, 2001.*

Artigos

Paulo Santos, José João, Orlando C. Rodríguez, Paulo Felisberto and Sérgio M. Jesus, "*Geometric and Seabed parameter estimation using a Vector Sensor Array - Experimental results from Makai experiment 2005*", in *Oceans 11*, Santander (Espanha), Junho 2011;

Geometric and Seabed parameter estimation using a Vector Sensor Array - Experimental results from Makai experiment 2005

Paulo Santos*, José João†, Orlando C. Rodríguez*, Paulo Felisberto* and Sérgio M. Jesus*

*Institute for Systems and Robotics

University of Algarve, 8005-139 Faro, Portugal

Email: {pjsantos,orodrig,pfelis,sjesus}@ualg.pt

†Instituto Superior de Engenharia

University of Algarve, 8005-139 Faro, Portugal

Email: jjoao@yahoo.com

Abstract—A vector sensor is constituted by one omnidirectional pressure sensor and three velocity-meters that are sensitive in a specific direction - x , y or z . Since a vector sensor is able to measure the three particle velocity directional components it acts as a spatial filter and therefore is advantageous in three dimensional direction of arrival (DOA) estimation. The potential gain obtained in DOA estimation can be extended to other geometric parameters such as source range and depth, as well as seabed parameters. The objective of this paper is to present experimental results of a four element vertical vector sensor array (VSA) data set collected during MakaiEx'05 experiment for geometric (range and depth) and seabed geoaoustic parameter estimation (sediment compressional speed, density and compressional attenuation). The parameter estimation problem is posed as an inversion method based on an extension of the conventional pressure only Bartlett estimator to particle velocity. The developed VSA based Bartlett estimator is proportional to the pressure only Bartlett estimator response by a directivity factor, providing an improved side lobe reduction or even suppression when compared with the pressure only response. This behavior will be illustrated for geometric and seabed parameters clearly showing the advantages of the use of VSA over hydrophone arrays. In source localization the VSA outperforms an array of hydrophones of same number of sensors. Moreover, when the VSA Bartlett estimator is applied for seabed parameter estimation, it will be shown that the estimation resolution of these parameters increased significantly, even for density and compressional attenuation, parameters difficult to estimate using an array of hydrophones.

Index Terms—Vector Sensor Array processing, Geoaoustic inversion; range and depth source localization.

I. INTRODUCTION

Acoustic vector sensors emerged in 1980s and due to their ability to measure both the acoustic pressure and the three particle velocity components, they are a potential alternative to traditional omnidirectional hydrophones, which measured the acoustic pressure only. Their practical usage in underwater applications started in the last two decades, where several authors conducted research on theoretical aspects of vector sensor processing [1]–[3]. The major advantage of vector sensors over hydrophones is that they capture directional information and act as a spatial filter, which allow for high performance

small aperture Vector Sensor Arrays (VSA). The VSA has been proposed for three dimensional direction of arrival (DOA) estimation taking into account that it is able to estimate both elevation and azimuth angles, eliminates the well known left/right ambiguity and provides a better estimation resolution than hydrophone arrays. This behavior was presented in [4], where the horizontal plane orientation of the array axis of the VSA was determined using plane wave beamforming and the DOA of both low and high frequency sources were estimated. More recently, the VSA has been proposed in other underwater acoustic fields like underwater acoustic surveillance and port entrance security [5], underwater communication [6], [7] and geoaoustic inversion [8]–[10].

The objective of this paper is to present VSA data processing results in geometric (range and depth) and seabed (sediment compressional speed, density and compressional attenuation) parameter estimation, with low and high frequency signals. The potential gain of combining particle velocity with acoustic pressure for parameter estimation was presented in [10], where a VSA Bartlett estimator was developed. Herein, it will be seen that the VSA Bartlett estimator provides a higher estimation resolution of geometric and seabed parameters, not possible using an array of same number of hydrophones. Furthermore, the advantages of the VSA in seabed characterization are shown using high-frequency signals. These results suggest that is possible to obtain seabed geoaoustic properties estimates in this considered high-frequency band (8-14 kHz) using a small aperture VSA with a few elements. The data considered herein was acquired with a four-element vertical VSA, from Wilcoxon TV-001 [5], in the 100-14000 Hz band, in a shallow water area off the Kauai Island, Hawaii (USA) during the Makai experiment [11], from 15 September to 2 October 2005.

This paper is organized as follows: Section II reviews the vector sensor measurement model and the theory related to the VSA-based Bartlett estimator for generic parameter estimation. The derived Bartlett-based estimators are applied for seabed parameter estimation in simulated context to demon-

strate the capabilities of using the VSA for inversion problems. Section III makes a general description of the bathymetry and the geometry of Makai experiment 2005, as well as of the received signals used in this paper. The experimental results of source range and depth localization of ship's noise and the estimation results of seabed parameters using high-frequency signals are also presented. Finally, Section IV draws some conclusions.

II. THEORETICAL FRAMEWORK

The theory related with the measurement model, which merged the particle velocity components with the acoustic pressure and the extended VSA - based Bartlett estimator was presented in [10]. This data model and the estimator was derived considering an existing Gaussian beam physical model specifically modified to account for particle velocity - TRACEO model [12]. This section reviews the particle velocity - pressure joint model and presents the improvement that is made with the VSA based Bartlett estimator relative to the conventional pressure only Bartlett estimator. Next, the advantages of the VSA Bartlett estimator are illustrated in simulated context for seabed parameter estimation using high-frequency signals.

A. Measurement model

A vector sensor measures the acoustic pressure $p(t)$ (omni directional part of the vector sensor) and the three particle velocity components $v_x(t)$, $v_y(t)$ and $v_z(t)$ (directional part of the vector sensor) in a particular point of space. Considering that the source emitting the signal impinging in the vector sensor is in the far-field and is band limited, the particle velocity \mathbf{v} can be calculated from the linear acoustic equation (Euler's equation) through the relationship with the acoustic pressure as:

$$\mathbf{v} = -\frac{i}{\omega\rho}\nabla p, \quad (1)$$

where ρ represents the density of the watercolumn, ω is the working frequency of the propagating acoustic wave and $\mathbf{v} = [v_x, v_y, v_z]$ are the particle velocity components.

Assuming a small aperture array and a generic set of environmental parameters (Θ_0) that characterizes the channel, including geometric or geoacoustic parameters, the particle velocity can be written as:

$$\mathbf{v}(\Theta_0) = \mathbf{u}(\Theta_0)p, \quad (2)$$

where the vector \mathbf{u} is a unit vector related to the pressure gradient [10].

Following, it is assumed that the propagation channel can be represented by a linear time-invariant system and that a sound source emits a narrowband signal s at frequency ω (the frequency dependence is omitted in the sequel), for a particular set of channel parameters Θ_0 . The field measured at L vector sensor elements, combining the acoustic pressure part \mathbf{y}_p and the particle velocity part \mathbf{y}_v is given by [10]:

$$\mathbf{y}_{pv}(\Theta_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_p(\Theta_0) \\ \mathbf{y}_v(\Theta_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{u}(\Theta_0) \end{bmatrix} \otimes \mathbf{h}_p(\Theta_0)s + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_p \\ \mathbf{n}_v \end{bmatrix}, \quad (3)$$

where $\mathbf{h}_p(\Theta_0)$ is the channel frequency response at the L pressure sensors, \otimes is the Kronecker product and \mathbf{n}_p and \mathbf{n}_v are the additive noise for pressure and particle velocity, respectively. It is assumed that the additive noise is zero mean and white, both in time and space (both between VSA elements and between sensors within each element), with variance σ_n^2 and uncorrelated with the signal s .

B. VSA Bartlett estimator

Parameter estimation can be casted as an inversion problem, which uses the measured data to infer the parameter values that characterize the ocean. A common signal processing technique, initially proposed for source localization and extended for other parameters such as seabed parameters, is Matched-Field Inversion (MFI). The basic idea is to use a replica of the received acoustic field as given by a dully calibrated propagation model. This technique directly correlates the measured data with the modeled replica data (typically with the acoustic pressure data), maximizing the output power for a given input signal [13].

Taking into account the maximization problem described in [10], [13], the Bartlett estimator when only the acoustic pressure part of the vector sensors are considered (p -only), can be written as:

$$\begin{aligned} P_{B,p}(\Theta) &= \frac{\mathbf{h}_p^H(\Theta)\mathbf{R}_p(\Theta_0)\mathbf{h}_p(\Theta)}{\mathbf{h}_p^H(\Theta)\mathbf{h}_p(\Theta)} \\ &= B_p(\Theta)\sigma_s^2 + \sigma_n^2, \end{aligned} \quad (4)$$

where $B_p(\Theta)$ is the noise-free beam pattern for acoustic pressure.

Considering only the velocity component of the VSA data model (3) and using the same formulation described for the acoustic pressure, it was shown in [10] that the Bartlett estimator when only the particle velocity (v -only) is considered, can be given by:

$$\begin{aligned} P_{B,v}(\Theta) &= \frac{[\mathbf{u}^H(\Theta)\mathbf{u}(\Theta_0)]^2}{\mathbf{u}^H(\Theta)\mathbf{u}(\Theta)} B_p(\Theta)\sigma_s^2 + \sigma_n^2 \\ &\propto [\cos^2(\delta)]P_{B,p}(\Theta), \end{aligned} \quad (5)$$

where $B_p(\Theta)$ is the beam pattern for p -only defined in (4), δ is the angle between the replica vector $\mathbf{u}(\Theta)$ and the data vector $\mathbf{u}(\Theta_0)$, taking into account that the inner product between two vectors is proportional to the cosine of the angle between these vectors. Based on this equation, it can be concluded that the v -only Bartlett estimator response is proportional to the p -only Bartlett estimator response by a directivity factor (in this case $[\cos^2(\delta)]$), which provides an improved side lobe reduction (or even suppression) when compared with the p -only response.

The effect of merging the acoustic pressure and the particle velocity in the data model (3) can be seen on the VSA Bartlett estimator, which is given by [10]:

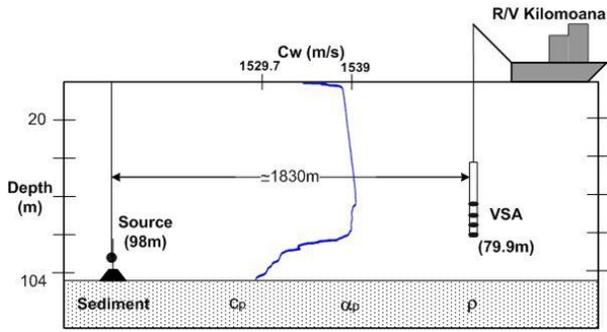


Fig. 1. Simulation scenario based on typical setup of Makai experiment with a large mixed layer, characteristic of Hawaii. The source is bottom moored at 98 m depth and 1830 m range. The VSA is deployed with the deepest element at 79.9m.

$$\begin{aligned}
 P_{B,pv}(\Theta) &= \frac{\left(\begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{u}(\Theta) \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{u}(\Theta_0) \end{bmatrix} \right)^2}{\begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{u}(\Theta) \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{u}(\Theta) \end{bmatrix}} B_p(\Theta) \sigma_s^2 + \sigma_n^2 \\
 &\propto [1 + \cos(\delta)]^2 P_{B,p}(\Theta) \\
 &\propto [4 \cos^4(\frac{\delta}{2})] P_{B,p}(\Theta). \quad (6)
 \end{aligned}$$

One can conclude that when the VSA Bartlett estimator is considered, the output response is proportional to the p -only Bartlett response, where the constant of proportionality is the directivity factor $[4 \cos^4(\frac{\delta}{2})]$. This directivity factor provides a wider main lobe as shown in (6) when compared to the v -only Bartlett estimator (5), due to the cosine of the half angle. However, the inclusion of the acoustic pressure on the estimator eliminates the ambiguities caused by the $[\cos^2(\delta)]$ even when frequencies higher than the array design frequency (at which array spacing equals a half wavelength) are used. This behavior was presented in [10], where the Bartlett estimators previous described were applied for DOA and seabed parameters estimation. The VSA based Bartlett estimator provides clearly an increased estimation resolution of ocean parameters than the p -only estimator. Next section presents a brief study of the application of these estimators for seabed parameter estimation in a simulated context.

C. Simulations results

The highlighted advantages of the VSA Bartlett estimator over hydrophone arrays are tested for seabed parameter estimation, considering the simulation scenario shown in Fig. 1. This scenario is partially based on the MakaiEx setup (for which results on experiment data will be presented in Section III), has a deep mixed layer characteristic of Hawaii and the bathymetry at the site is range independent with a water depth of 104 m. The source is bottom moored at 98 m depth and 1830 m range. The 10 cm spacing four-element vertical VSA is deployed with the deepest element at 79.9 m depth. The frequency used in this simulation is 13000 Hz.

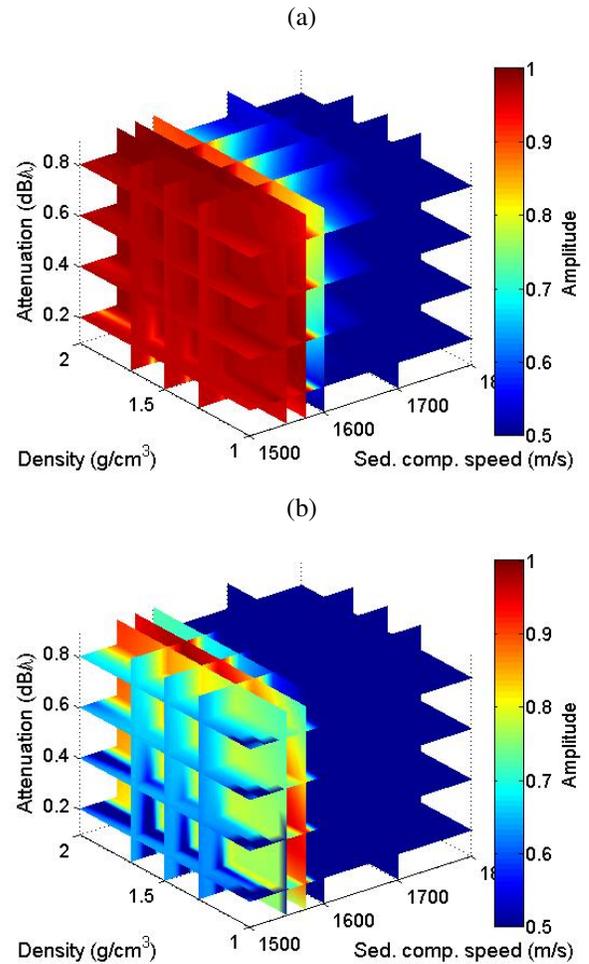


Fig. 2. Three dimensional representation of the simulation results obtained with the power Bartlett estimator for the three seabed parameters at frequency of 13 kHz considering: p -only (Eq. 4) with 4 hydrophones (a) and the full VSA (Eq. 6) (b).

The seabed parameters to be considered herein are sediment compressional speed (c_p), density (ρ) and compressional attenuation (α_p). The true values for these parameters considered in simulation were taken as: $c_p = 1575$ m/s, $\rho = 1.5$ g/cm³ and $\alpha_p = 0.6$ dB/ λ . The Bartlett estimators presented in Section II-B are used to estimate these parameters, taking into account that the field replicas are generated using the TRACEO Gaussian beam model [10], [12].

The Bartlett estimator power, $P_B(\alpha_p, \rho, c_p)$, is determined when parameters vary in the following range: $[0.1, 0.9]$ dB/ λ for compressional attenuation, $[1, 2]$ g/cm³ for density and $[1500, 1800]$ m/s for sediment compressional speed. The Bartlett estimator power, $P_B(\alpha_p, \rho, c_p)$, depends on three parameters so, a three dimensional representation can be illustrated by a cube. As shown in Fig. 2 for the Bartlett estimator power with several slices for each parameter, considering the p -only estimator with 4 hydrophones (a) and the full VSA estimator (b).

In Fig. 2(a) it can be observed that the p -only Bartlett

estimator has a very large main lobe with an amplitude power above 0.9, for sediment compressional speed values below 1600 m/s and for any value of the attenuation and density, making it very difficult to obtain an estimate of the three seabed parameters. However, when this representation is compared with the full VSA Bartlett estimator, Fig. 2 (b), it can be seen that the main lobe is reduced mainly for the sediment compressional speed. The tests show that the Bartlett estimator is decreasingly sensitive to sediment compressional speed, density and compressional attenuation as expected, but when the full VSA Bartlett estimator is used the estimation resolution of these parameters increases. This performance is better understood when the 2D-cross sections ambiguity surfaces are obtained.

Fig. 3 and Fig. 4 show the 2D cross-sections ambiguity surfaces for: sediment compressional speed versus density, sediment compressional speed versus compressional attenuation and density versus compressional attenuation. The p -only estimator results are presented in Fig. 3 while the full VSA Bartlett estimator results are presented in Fig. 4. On the left and below each ambiguity surface we show the 1D cross-section in order to understand the estimation power variation for each parameter. These figures illustrate the improvement that is obtained with the full VSA Bartlett estimator when compared with the p -only estimator, which presents wide main lobes with an amplitude power above 0.95 for all parameters, Fig. 3. The full VSA Bartlett estimator shows an improved estimation resolution for sediment compressional speed compared to that of the p -only, where a narrow main lobe can be seen in Fig. 4 (a) and (b) and confirmed by 1D cross-section on left side of these plots. Even for density and compressional attenuation (parameters with very difficult estimation using the p -only estimator, Fig. 3 (c)), the full VSA Bartlett estimator increases considerably the estimation resolution with an amplitude power above 0.8, Fig. 4 (c). One can conclude that the VSA increases the estimation resolution of the three seabed parameters and its parameter estimation capability is demonstrated using a few elements VSA.

The potential gain of using the VSA in inverse problems can be highlighted when the individual components of the particle velocity are used. Observing the ambiguity surfaces 1D cross-sections for each parameter, Fig. 5, considering the individual particle velocity components, the v -only and the full VSA Bartlett estimator, some conclusions can be drawn. First, the v -only Bartlett estimator (green line) has a narrower main lobe than the full VSA Bartlett estimator (red line) due to the directivity factors obtained in Eqs. 5 and 6. The directivity factor $[4 \cos^4(\frac{\delta}{2})]$ provides a wider main lobe than $[\cos^2(\delta)]$ but eliminates possible ambiguities (similarly as for DOA estimation in [10]). Second, the plots obtained for horizontal particle velocity components v_x (dashed line) and v_y (circles) are coincident (and they are similar to the acoustic pressure response), since these components mostly depend on low-order modes, thus on the rays which have little or no interaction with the seabed. Third and the most importantly, the vertical component v_z (blue line) has a much higher sensitivity to

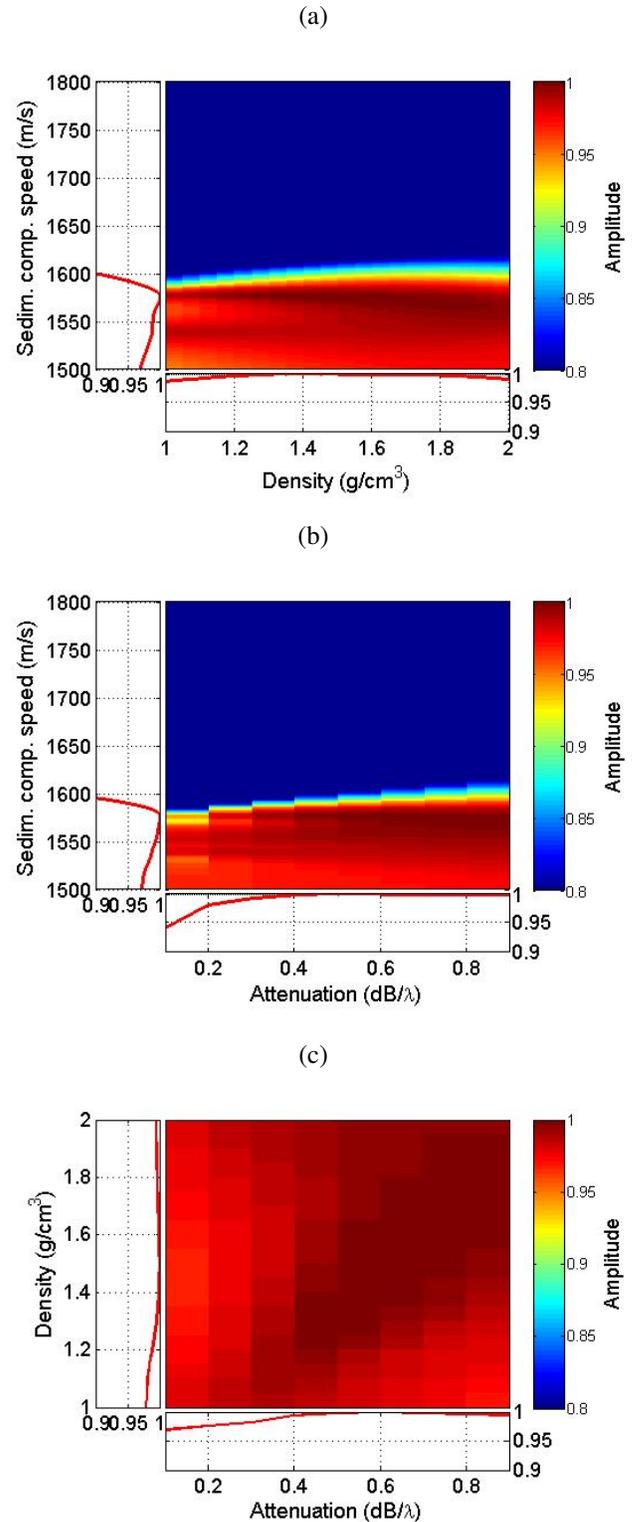


Fig. 3. 2D cross-sections of ambiguity surfaces estimation simulation results obtained with the p -only Bartlett estimator (Eq. 4) with 4 hydrophones, at frequency of 13000 Hz, for the true values parameters ($c_p = 1575$ m/s, $\rho = 1.5$ g/cm³ and $\alpha_p = 0.6$ dB/λ) fixing the compressional attenuation (a), fixing the density (b) and fixing the sediment compressional speed (c). In the left and down side of the ambiguity surfaces are presented the 1D cross-sections for each parameter.

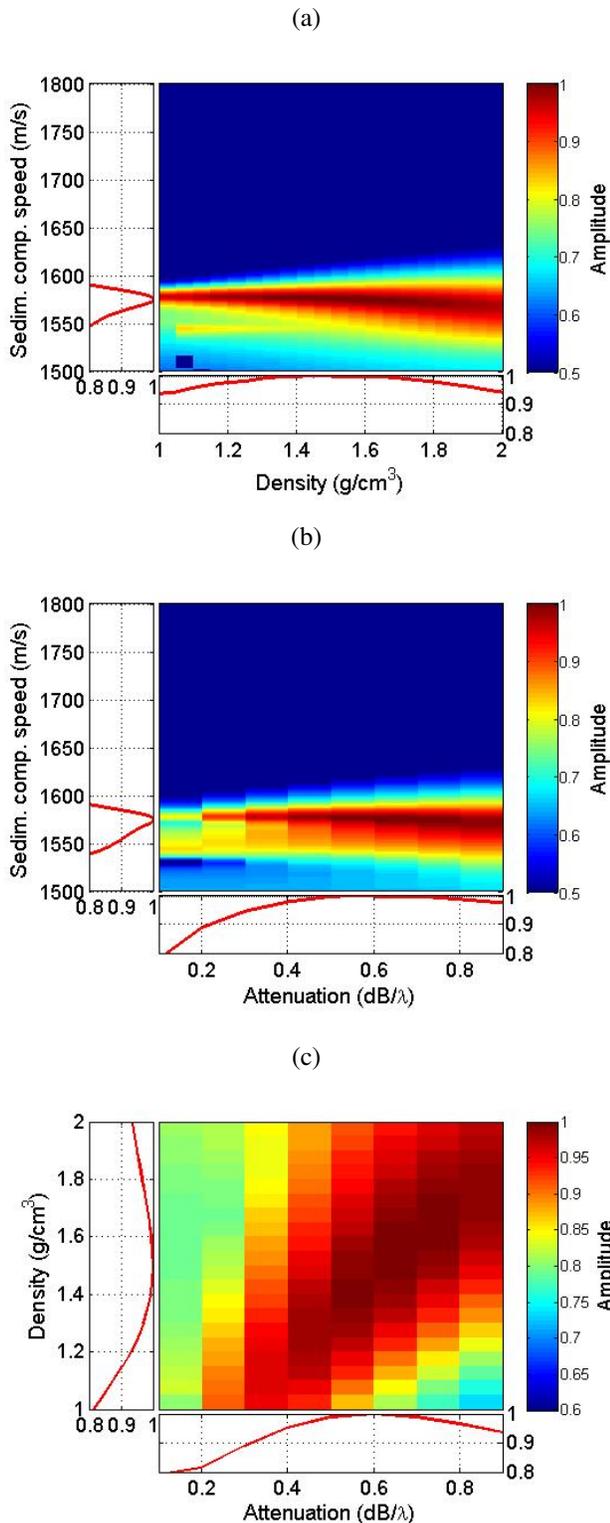


Fig. 4. 2D cross-sections of ambiguity surfaces estimation simulation results obtained with the full VSA Bartlett estimator (Eq. 6) at frequency of 13000 Hz, for the true values parameters ($c_p = 1575$ m/s, $\rho = 1.5$ g/cm³ and $\alpha_p = 0.6$ dB/λ) fixing the compressional attenuation (a), fixing the density (b) and fixing the sediment compressional speed (c). In the left and down side of the ambiguity surfaces are presented the 1D cross-sections for each parameter.

ocean bottom parameters than the others components and than v -only or than the full VSA estimator. In fact, this sensitivity is influenced by the high-order modes with a larger contribution to the vertical component due to their grazing angles. Fig. 5 suggests that vertical (v_z) particle velocity only component based Bartlett estimator potentially provides highest estimation resolution observed for all three seabed parameters.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

The data analyzed herein was acquired by a four-element vertical VSA in the 100-14000 Hz band, during the Makai experiment (MakaiEx) [11], off Kauai Island, Hawaii (USA), on September 20th, 2005. The vertical VSA used during MakaiEx consisted of a four element with 10 cm spacing and collected data emitted from both towed and fixed acoustic sources. The VSA was deployed during three periods but only the experimental results of 20th September are presented here.

A. Experimental setup

The bathymetry map of the MakaiEx area and the location of the equipment on September 20th are depicted in Fig. 6. On this day, the VSA was fairly close to the stern of R/V Kilo Moana, tied to a vertical cable and with the deepest element positioned at 79.9 m in a water depth of approximately 104 m. The VSA acquired data from two acoustic sources testbed TB1 and TB2, which were bottom moored at 201.5 m and 98 m depth and 1650 m and 1830 m range, respectively, Fig. 6. Herein, only the signals emitted by TB2 were used to process the data due to the range independent bathymetry of approximately 104 m. The emitted signals were a sequence of LFM's, multitones, M-sequence and communication signals in the 8-14 kHz band.

Fig. 7 presents the spectrogram of 10 s block of the acoustic source TB2 emitted signal and acquired by the pressure sensor of the deepest vector sensor element. The tones were used to process the VSA data for seabed parameter estimation. In addition, lower band signals are presented in Fig. 8 (a) and the respective power spectrum (b), where two dominant frequencies - 180 and 300 Hz appear. These frequencies were used to process the VSA data for geometric parameter estimation and were assumed to be part of ship's noise signature (noise generated by R/V Kilo Moana), which were used to find the horizontal plane orientation of the x and y -axis, otherwise unknown [4].

B. Three dimension ship's noise source localization

The three dimension localization is formulated based on the geometric parameter estimation of range and depth of the ship's noise signature, taking as reference the knowledge of the ship's noise DOA, previously estimated [4]. The results were obtained for the low frequency of 180 Hz on September 20th, Fig. 8 (a) and presented in [14].

Fig. 9 presents the normalized ambiguity surfaces for noise source range and depth obtained with the Bartlett estimators described in section II-B, using the p -only (a) and the full VSA (b) Bartlett estimators. The ambiguity surface (a), when

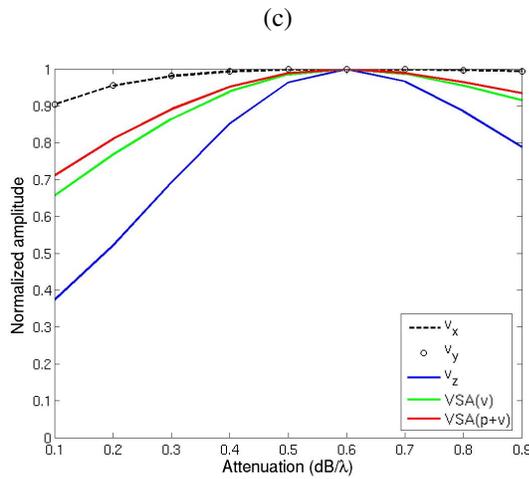
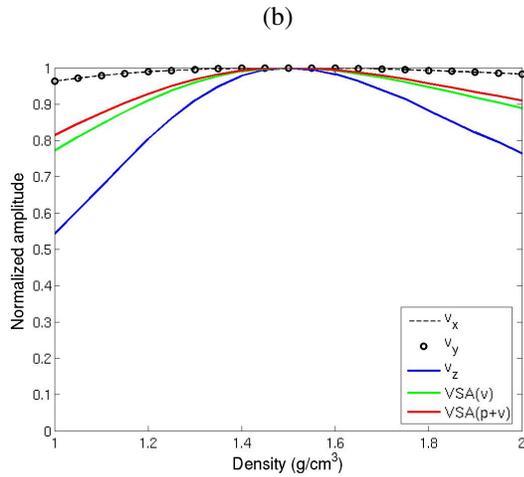
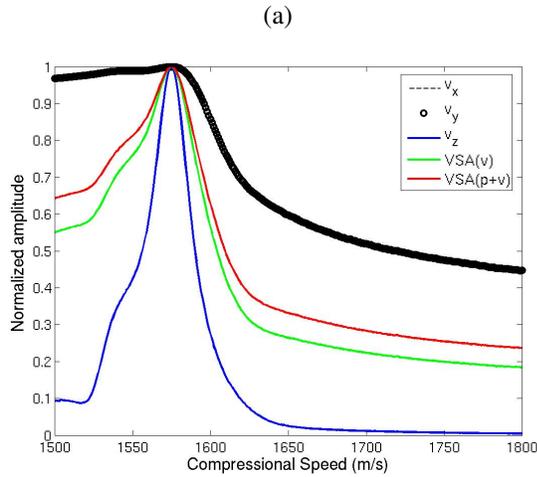


Fig. 5. Ambiguity surfaces 1D cross-sections obtained with the normalized Bartlett estimator at frequency of 13000 Hz, considering: individual data components (v_x , v_y and v_z), v -only (Eq. 5) and full VSA (Eq. 6) for sediment compressional speed (a), density (b) and compressional attenuation (c).

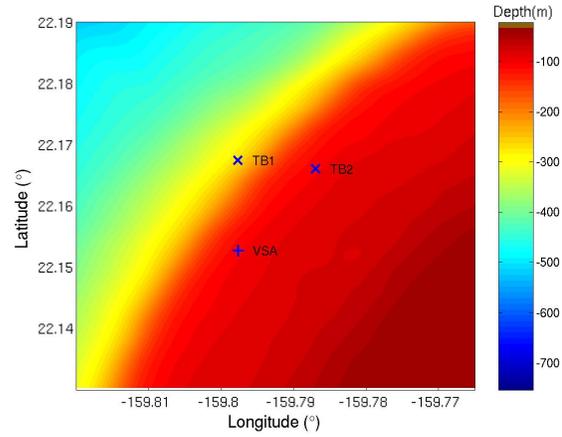


Fig. 6. MakaiEx bathymetry map of the area with the position of the acoustic sources TB1, TB2 and the VSA on September 20th 2005.

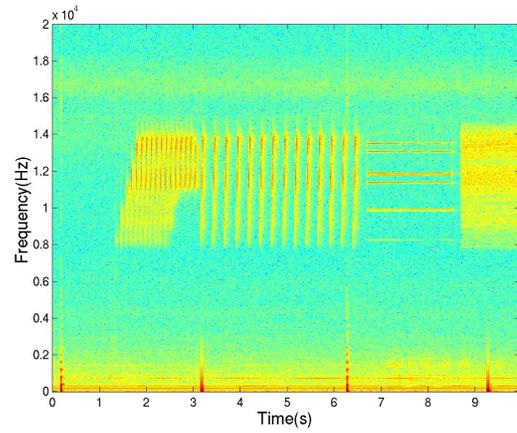


Fig. 7. Sample of the signal emitted by acoustic source TB2 and received in the pressure sensor at the deepest vector sensor: a sequence of LFM's, multitones and M-sequences in the 8-14 kHz band.

p -only estimator is considered, Eq. 4, presents multiple side lobes becoming difficult to define a maximum for the source range and depth. On the other hand, when the full VSA is used, Eq. 6, a well defined narrow main lobe is obtained, Fig. 9 (b). The improved side lobe reduction provided by the VSA, clearly outperforms an array of hydrophones with the same number of sensors, for range and depth source localization purposes.

Fig. 10 presents the 1D cross-sections of the ambiguity surface obtained with the full VSA Bartlett estimator, Fig. 9 (b), for several instants in time providing that the maximum of source range and depth appears at the same position. This figure illustrates the stability of the results during the period of data acquisition (on September 20th, the VSA acquired almost two hours of data), which maximum appears at 8.6 m for depth and 35.7 m for range (black arrow in Fig. 10). The range is in agreement with R/V Kilo Moana dimensions, which has a length of approximately 57 m. The noise source is assumed to

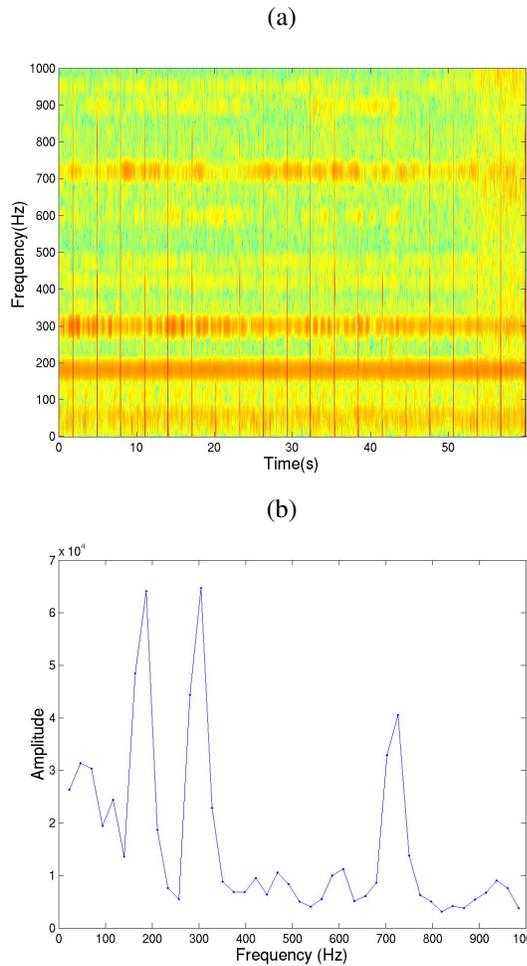


Fig. 8. Sample of the R/V Kilo Moana noise in the lower band (below 500 Hz) as received in the pressure sensor at the deepest vector sensor (a) and the respective power spectrum (1 s averaging time) of noise detected, where two dominant lower frequencies (180 and 300 Hz) are presented (b).

be in the middle of the ship so, 35.7 m is the distance between the VSA (which was tied to a vertical cable) and the middle of the ship. Relatively to 8.6 m depth, this value is high but the result is in agreement with the elevation angle obtained for the ship's noise DOA, [4], bearing in mind that VSA was deployed with the deepest element positioned at 79.9 m. Some displacements of VSA from its vertical position may cause this error.

C. Seabed parameters estimation

The observed advantages of the VSA Bartlett estimator relatively to hydrophone arrays for seabed parameters estimation in Section II-C, will be presented using the experimental VSA data acquired on September 20th, where the signal was emitted by the acoustic source TB2, Fig. 7. The data tone at 13078 Hz was used.

The Bartlett estimators described in Section II-B are applied to the estimation of the sediment compressional speed, density and compressional attenuation. It was seen in simulated con-

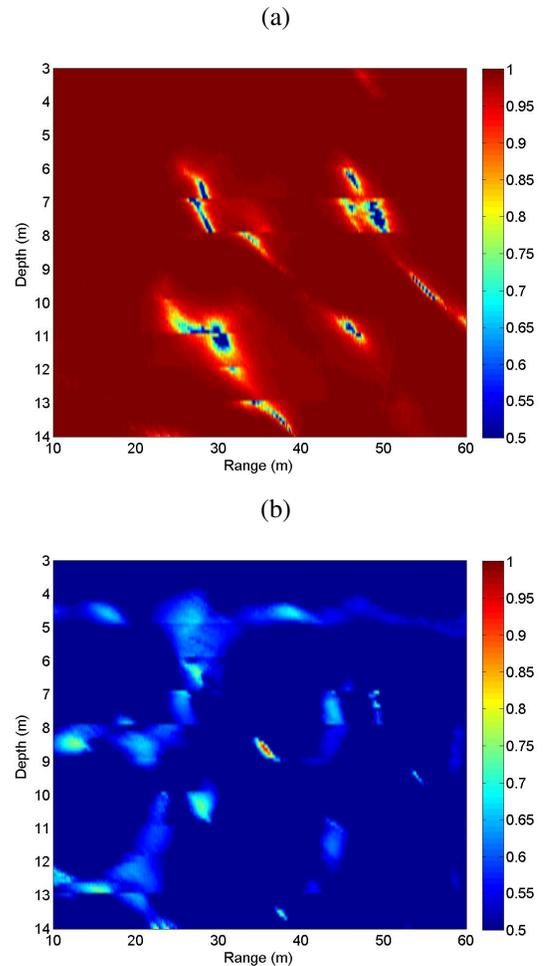


Fig. 9. Normalized ambiguity surfaces for range and depth at frequency 180 Hz of noise source on September 20th, obtained with Bartlett estimator considering: p -only (Eq. 4) (a) and the full VSA (Eq. 6) (b).

text and verified with experimental results that the estimator has a higher sensitivity to the variability of the sediment compressional speed than to that of density or compressional attenuation. Thus, several ambiguity surfaces were generated to find the best match between the three parameters.

The sediment compressional speed can be obtained with higher estimation resolution than density or compressional attenuation, thus it was searched taking into account the maxima of the Bartlett estimator power, $P_B(\alpha_p, \rho, c_p)$. Fig. 11 presents the ambiguity surfaces cross-sections for the sediment compressional speed throughout almost two hours of data acquisition, considering the p -only (a), the full VSA (b) and the vertical particle velocity only component (c) Bartlett estimators. These plots show the stability of the results during the data acquisition period and estimate that sediment compressional speed points to values of approximately 1575 m/s, with an increased order of estimation resolution from the p -only to the vertical particle velocity component only estimator. As already seen in the simulations, the vertical particle velocity component has a narrow main lobe due to the higher sensitivity

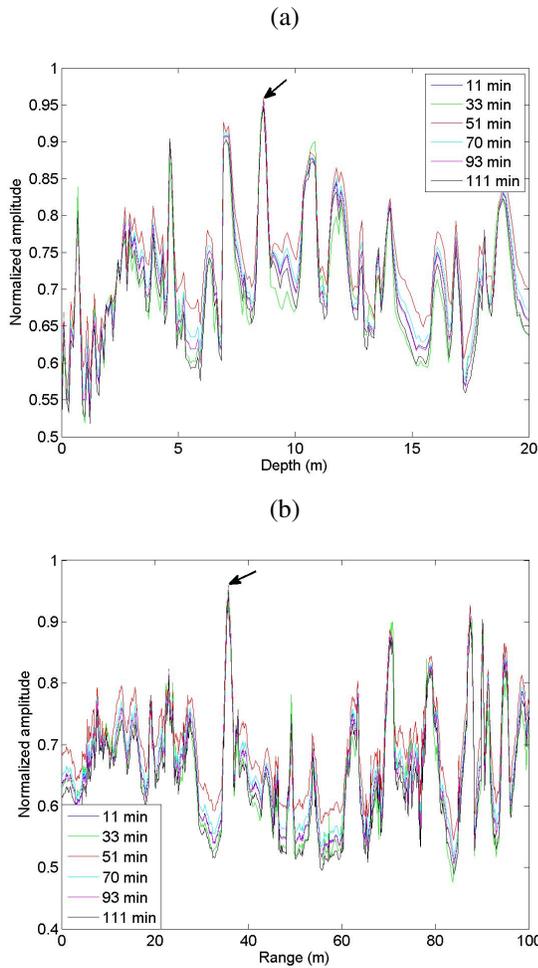


Fig. 10. Normalized 1D cross-sections at frequency 180Hz on September 20th for several time intervals during data acquisition, considering the full VSA Bartlett estimator (Eq. 6) for estimation of: depth (a) and range (b). The black arrow indicates the maximum value obtained for each estimated parameter.

to bottom structure, Fig.11 (c). Note that, the p -only estimator, Fig.11 (a), presents two lobes but one of them appears at the estimated value of sediment compressional speed 1575 m/s - at the same position of the others estimators. Considering this estimated value for sediment compressional speed, the estimation of density and compressional attenuation is determined.

Fig. 12 shows the ambiguity surface of geometric mean over time of estimates during the period of data acquisition for compressional attenuation and density, considering the estimated value of 1575 m/s for sediment compressional speed, using: the p -only Bartlett estimator (a), the full VSA Bartlett estimator (b) and the vertical particle velocity only component estimator (c). Fig. 12 (a) presents a large main lobe, which results in a poor information about the seabed parameters. On the other hand, the full VSA estimator, Fig. 12 (b), presents a narrow main lobe concluding that both parameters, compressional attenuation and density can be obtained with better estimation resolution than with the p -only estimator.

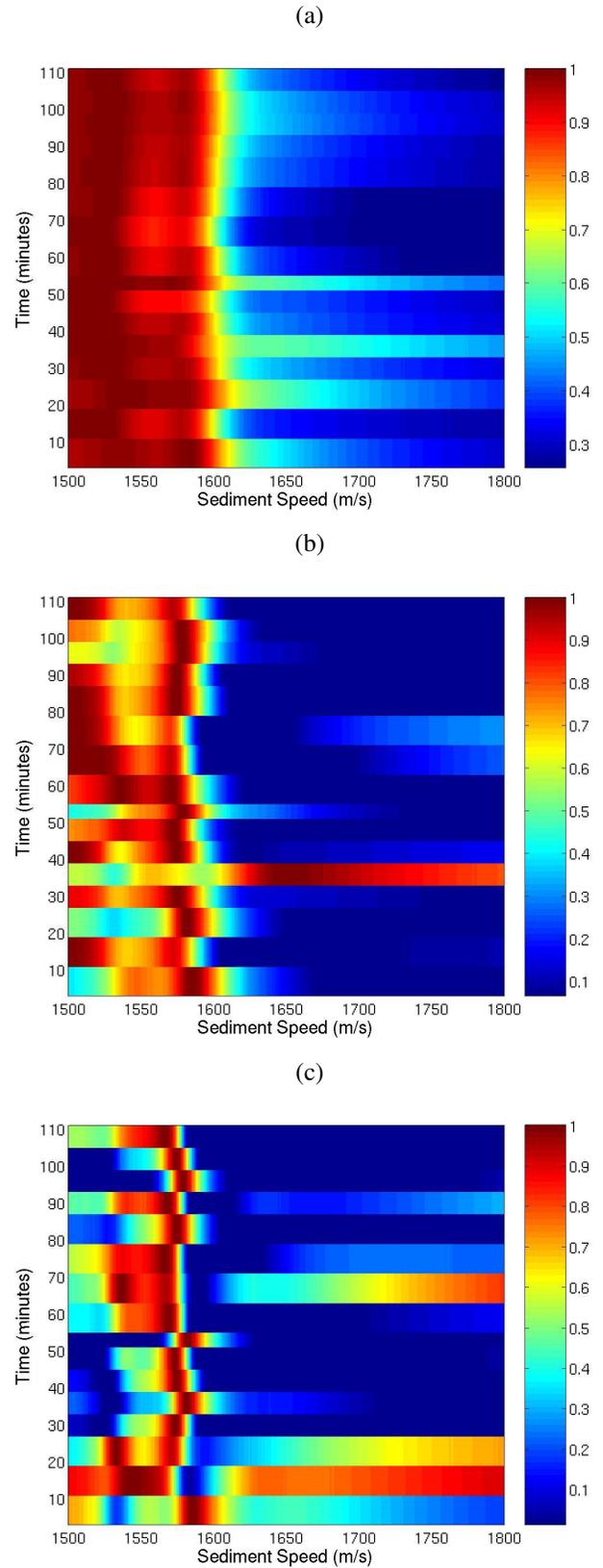


Fig. 11. Measured data normalized ambiguity surfaces for sediment compressional speed during data acquisition period (almost two hours), considering the Bartlett estimators: p -only (a), full VSA (b) and vertical particle velocity only component (c).

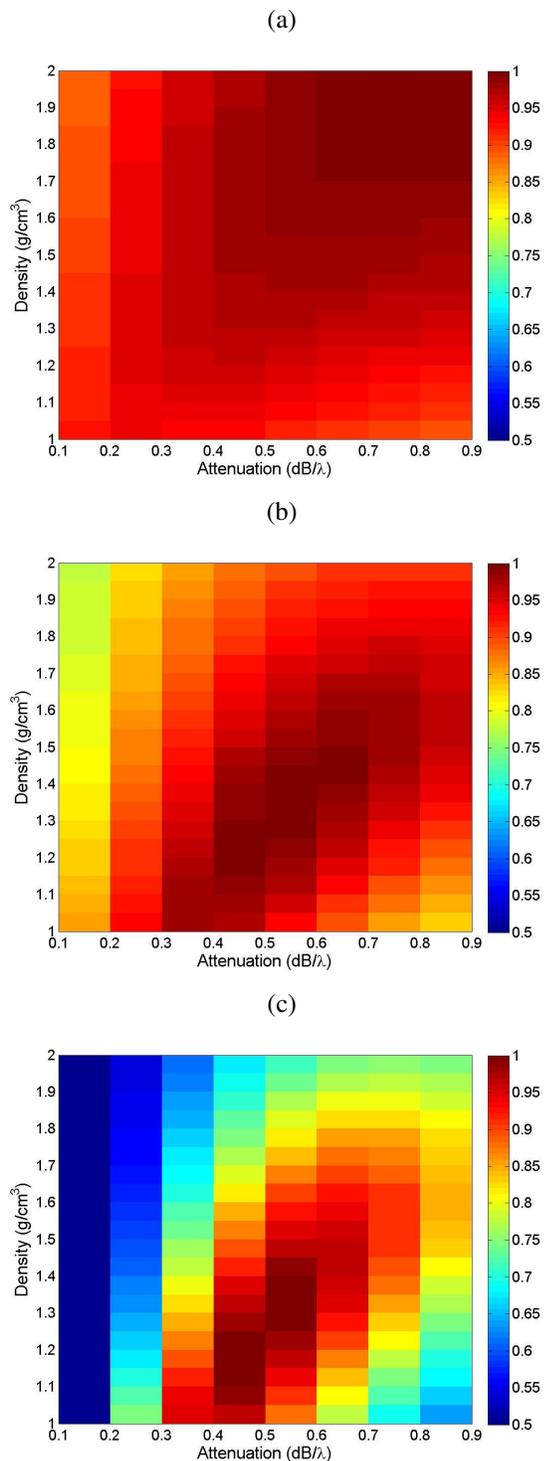


Fig. 12. Measured data normalized ambiguity surfaces for compressional attenuation and density using the geometric mean over time of estimates along the acquisition period, taking into account the sediment compressional speed value of 1575 m/s, considering the p -only (a), the full VSA (b) and the vertical particle velocity component only Bartlett estimators (c).

As already seen with simulation results, the vertical particle velocity only component, Fig. 12 (c), confirms this result but with a even narrower main lobe than the other estimators. It is possible to estimate the values for density and compressional attenuation, as expected with less sensitivity than sediment compressional speed, however it can be observed in Fig. 12 (c), that the density points to values of approximately 1.35 g/cm^3 and the compressional attenuation to $0.5 \text{ dB}/\lambda$. These results show that a few elements VSA allows to estimate the three seabed parameters with a much higher resolution than that obtained with an array of same number of hydrophones. Reliable estimates can be attained using only the vertical particle velocity component, resulting in a crucial advantage of the use of vector sensors in ocean parameter estimation. The results are in agreement with those presented in [10] and with the historical data of the area.

IV. CONCLUSION

This paper presents experimental results of VSA data acquired in shallow water area off the Island of Kauai, Hawaii (USA), during the MakaiEx 2005 experiment, for geometric (range and depth) and seabed parameters estimation. The proposed inversion problem based on VSA Bartlett estimator was used to estimate source range and depth and seabed parameters such as sediment compressional speed, density and compressional attenuation. The classical Bartlett estimator adapted to vector sensor information provides better estimation results for geometric and seabed parameters than hydrophone arrays with the same aperture. The results for range and depth noise source localization were presented, where the full VSA Bartlett estimator shows higher estimation resolution than the p -only estimator with 4 hydrophones and these are consistent over a significant time interval. It was seen that the estimation of sediment compressional speed produced from the vertical particle velocity only component has a better estimation resolution and are stable during the data acquisition period (almost two hours). Furthermore, the VSA-based measurements also produced reliable estimates of sediment density and compressional attenuation, mainly when the vertical particle velocity only component is used. Note that these parameters are normally difficult to estimate with pressure measurements alone. The particle velocity information enhances geometric and seabed geoaoustic parameters estimation, resulting in a better parameter estimation resolution. The band of the probe signal used here was well above that traditionally used in geoaoustic inversion, thus an interesting outcome of this paper is that the channel impulse response has sufficient structure to support estimation of seabed geoaoustic parameters in this frequency band.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Michael Porter, chief scientist for the Makai Experiment, Jerry Tarasek at Naval Surface Weapons Center for the vector sensor array used in this work. The authors also thank Bruce Abraham at Applied Physical Sciences for providing assistance with the data acquisition and

the team at HLS Research, particularly Paul Hursky for their help with the data used in this analysis. This work is funded by National funds through FCT - Foundation for Science and Technology under project SENSOCEAN (PTDC/EEA-ELC/104561/2008).

REFERENCES

- [1] A. Nehorai and E. Paldi, "Acoustic vector-sensor array processing," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 42, no. 9, pp. 2481–2491, September 1994.
- [2] C. Wan, A. Kong, and C. Liu, "A comparative study of DOA estimation using vector/gradient sensors," in *Proceedings of Oceans06, Asia, Pacific*, May 16–19 2007, pp. 1–4.
- [3] B. A. Cray and A. H. Nuttall, "Directivity factors for linear arrays of velocity sensors," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 110, no. 1, pp. 324–331, July 2001.
- [4] P. Santos, P. Felisberto, and P. Hursky, "Source localization with vector sensor array during Makai experiment," in *Proceedings of 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results*, Heraklion, Greece, June 25–29 2007, pp. 985–990.
- [5] J. C. Shipps and B. M. Abraham, "The use of vector sensors for underwater port and waterway security," in *Proceedings of Sensors for Industry conference*, New Orleans, Louisiana, USA, January 27–29 2004, pp. 41–44.
- [6] A. Abdi, H. Guo, and P. Sutthiwan, "A new vector sensor receiver for underwater acoustic communication," in *Proceedings MTS/IEEE Oceans*, Vancouver, BC, Canada, 2007, pp. 1–10.
- [7] A. Song, M. Badiey, P. Hursky, and A. Abdi, "Time reversal receivers for underwater acoustic communication using vector sensors," in *IEEE*, Quebec, Canada, September 2008, pp. 1–10.
- [8] P. Santos, P. Felisberto, and S. M. Jesus, "Estimating bottom properties with a vector sensor array during MakaiEx 2005," in *Proceedings of 2nd International workshop on Marine Technology, Martech07*, Vilanova i la Geltrú, Spain, November 15–16 2007, p. 77.
- [9] P. Santos, O. C. Rodríguez, P. Felisberto, and S. M. Jesus, "Geoacoustic matched-field inversion using a vertical vector sensor array," in *Proceedings of 3rd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results*, Nafplion, Greece, June 21–26 2009, pp. 29–34.
- [10] —, "Seabed geoacoustic characterization with a vector sensor array," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 128, no. 5, pp. 2652–2663, November, 2010.
- [11] M. Porter, B. Abraham, M. Badiey, M. Buckingham, T. Folegot, P. Hursky, S. Jesus, K. Kim, B. Kraft, V. McDonald, C. deMoustier, J. Preisig, S. Roy, M. Siderius, H. Song, and W. Yang, "The Makai Experiment: High-frequency acoustics," in *Proceedings of 8th ECUA, Carvoeiro, Portugal*, S. M. Jesus and O. C. Rodríguez, Eds., vol. 1, 2006, pp. 9–18.
- [12] O. C. Rodríguez, *The TRACE and TRACEO ray tracing programs*, <http://www.siplab.fct.ualg.pt/models.shtml>, date last viewed 6/7/10.
- [13] H. Krim and M. Viberg, "Two decades of array signal processing research," *IEEE Signal processing magazine*, pp. 67–94, July 1996.
- [14] J. João and P. Felisberto, "Localização do ruído de navio com uma antena de sensores vectoriais," in *Proceedings of 7ª Edição das Jornadas do Mar*. Lisboa, Portugal: Escola Naval, November 2010.