

Processamento por Ajuste de Campo em acústica submarina e aplicações

C. Soares, S. M. Jesus

SiPLAB-FCT, Universidade do Algarve, PT-8005-139 Faro, Portugal

{csoares,sjesus}@ualg.pt

URL: <http://www.ualg.pt/fct/adeec/siplab/>

Resumo

A acústica submarina encontra aplicação em variados problemas tais como detecção activa ou passiva e localização de navios e submarinos, comunicações acústicas, tomografia acústica, procura de objectos enterrados e monitorização remota de fenómenos naturais, entre outros. Parte destas aplicações tornaram-se possíveis graças aos avanços tecnológicos da última década, que trouxeram um aumento significativo da capacidade computacional disponível. Hoje é possível resolver sistemas de equações diferenciais complexos dentro de tempos razoáveis tal que estes descrevem fielmente a propagação do som no oceano, constituindo assim um modelo de propagação acústica, e portanto uma importante ferramenta na predição da pressão acústica num determinado ponto do espaço, trazendo novas perspectivas a muitas aplicações. O Laboratório de Processamento de Sinal (SiPLAB) da FCT, Universidade do Algarve, desde há cerca de uma década que trabalha nalgumas aplicações em acústica submarina utilizando modelos de propagação acústica. As principais áreas de interesse têm sido o Processamento por Ajuste de Campo (ing. Matched-Field Processing, MFP), Tomografia Acústica Oceânica (Ocean Acoustic Tomography, OAT), e Comunicações Acústicas Submarinas. Na maioria dos casos o problema em mão é o de estimar o canal de propagação ou parâmetros desconhecidos que caracterizam o mesmo canal de propagação. Por exemplo, MFP foi originalmente concebido para localização de fontes acústicas, sendo o campo acústico recebido comparado com réplicas correspondentes a posições hipotéticas. As réplicas são geradas por um modelo de propagação acústica, e só podem ser geradas apropriadamente se existir suficiente conhecimento ambiental do canal de propagação. Mais tarde foi possível generalizar o MFP de forma a estender a procura a parâmetros ambientais desconhecidos, tendo esta técnica sido designada por Focalização. Este trabalho pretende resumir conceitos básicos de MFP e sua aplicação, assim como apresentar realizações tecnológicas recentes. Por fim são apresentados resultados experimentais, onde é demonstrado que é possível localizar fontes acústicas com uma antena derivante de apenas 4 hidrofones em tempo semi-real até 9 km de distância, bem como estimar parâmetros ambientais ou seguir a distância à qual se encontra uma fonte em movimento.

I. INTRODUÇÃO

A introdução de modelos físicos no processamento de sinais acústicos submarinos foi um dos maiores avanços alcançados neste campo [1], [2], [3]. A definição de um modelo físico para determinado cenário prático permite uma inclusão consistente de informação *a priori* no problema de estimação do sinal. Essa informação *a priori* consiste de características ambientais do cenário de propagação que, por meio da solução da equação de onda para tal cenário, restringe a pressão acústica medida a uma classe de sinais esperados bem definida. É esta redução que resulta no maior ganho de desempenho em termos de estimação de parâmetros.

Uma vez que a definição de um modelo físico requer o conhecimento (ou hipótese) de um número de grandezas mesuráveis, o desempenho do estimador/processador torna-se dependente dessas grandezas. Por outro lado, se os sinais emitidos e recebidos fôrem conhecidos, então será, em principio, possível estimar as características ambientais do meio de propagação, através de técnicas baseadas em *Processamento por Ajuste do Campo* (ing. Matched-Field Processing, MFP) que têm sido desenvolvidas desde há duas décadas: *Processamento por Ajuste do Campo* (MFP) para localização de fontes, *Tomografia por Ajuste do Campo* (MFT) para estimar propriedades do oceano, *Inversão por Ajuste do Campo* (MFI) para estimar parâmetros geoacústicos.

Este trabalho foi parcialmente apoiado por PRAXIS XXI, FCT, Portugal, sob o projecto ATOMS, contrato PD-CTM/P/MAR/15296/1999, LOCAPASS, e projecto AOB-JRP.

O MFP é um método de inversão que permite uma fonte ser localizada através de recepções numa antena de captadores, e foi na maioria utilizado para fontes acústicas no oceano (veja Ref. [1] e referências contidas). A técnica de MFP compara o campo recebido com campos designados por replicas geradas para todas localizações hipotéticas utilizando um modelo de propagação acústica. Os resultados de localização são degradados quando os dados de entrada do modelo de propagação são inexactos ou insuficientes. Nesse caso o experimentador está perante um problema de *desajuste de modelo* (ing. model mismatch), que pode ocorrer quando informação ambiental, tal como a velocidade do som não é conhecida com detalhe suficiente. Desajuste de modelo também pode ocorrer por incerteza na geometria, como seja a posição dos captadores da antena [4], [5]. Em MFP clássico, assume-se que o ambiente e a geometria são conhecidos e que o espaço de procura da inversão apenas inclui parâmetros respeitantes à posição da fonte.

Para suprimir o problema de desajuste de modelo, os chamados processadores de focalização [6] e processadores de incerteza (ing. uncertain processors) [7] emergiram na década de 90. Esta classe de processadores para além de incluir parâmetros de localização, também inclui parâmetros ambientais no espaço de procura, possibilitando a redução de potenciais problemas de desajuste. Foi demonstrado que com este tipo de processadores se poderia localizar fontes acústicas no oceano, ainda que o conhecimento ambiental fosse limitado [8], [9], [10].

O conceito de focalização tinha como ideia inicial estimar a localização de uma fonte acústica dando simultaneamente a possibilidade de ajustar parâmetros ambientais ou geométricos. O problema de localização passou a ser um problema de optimização multi-parâmetros. Na verdade, o experimentador poderia não estar interessado da exactidão das estimativas dos parâmetros ambientais, mas unicamente no resultado obtido para a localização da fonte.

Esta ideia assenta no facto de existir uma hierarquia em termos de sensibilidade do campo acústico, onde os parâmetros respeitantes à posição da fonte aparecem no topo. Esta hierarquia é feliz, uma vez que o objectivo principal é localização. Então o ambiente é tratado como uma lente acústica que é focada na tentativa de localizar a fonte acústica através de uma função de custo.

Uma questão importante em focalização é a sua implementação. Em particular, dado que o número de parâmetros desconhecidos poder ser elevado, é necessário implementar métodos computacionais eficientes. Em geral, não é possível efectuar uma procura exaustiva, pelo que se deverá utilizar métodos de procura global. Este tipo de métodos, como sejam os algoritmos genéticos (GA) têm a vantagem de olhar para a função de custo de forma global, ao contrário dos métodos de procura local, como sejam métodos de gradientes, e de necessitarem calcular apenas uma ínfima parte dos pontos da função de custo para encontrar o máximo.

A focalização foi vista como uma generalização do MFP uma vez que tanto a localização da fonte como o ambiente poderão ser desconhecidos ou parcialmente conhecidos. A generalização do MFP permitiu o desenvolvimento da Tomografia Acústica Oceanica (ing. OAT, Ocean Acoustic Tomography) na forma de MFT ou MFI, uma vez que isso permitiu incluir virtualmente qualquer parâmetro desconhecido no espaço de procura. Sendo OAT uma técnica de estimação das propriedades do oceano, uma das hipóteses de trabalho do conceito inicial é que a geometria fonte-receptores é bem conhecida por parte do experimentador. Essa hipótese de trabalho pôde ser relaxada através da aplicação do MFT, visto que se pode assumir que o conhecimento acerca da localização da fonte é limitado.

No entanto, é necessário ter em linha de conta um problema fundamental: as técnicas baseadas em MFP assentam na garantia da unicidade do campo acústico, ou seja, que para cada conjunto de parâmetros hipotéticos o campo acústico gerado seja único, o que equivale a garantir que a solução que maximiza a função de custo é única. O canal de propagação é visto como um sistema caracterizado por parâmetros de diversa ordem, como sejam geometria, coluna de água, geoacústica, entre outros. Então um conceito de grande importância no contexto da focalização e da estimação multi-parâmetros é o de *sistema equivalente*. Se o número de graus de liberdade for demasiado

elevado, poderemos obter um sistema de propagação que, embora tenha características diferentes, tenha resposta acústica semelhante. Este problema aparentemente teórico torna-se real na prática por diversas razões como sejam o erro de modelização inerente, quer do ponto de vista físico, quer do ponto de vista de modelização dos sinais, ou a simples presença de ruído de diversos tipos (ruído electrónico, ambiental, ou produzido por fontes pontuais). Uma das formas de aumentar a unicidade do campo acústico é o aumento da frequência dos sinais emitidos [11], uma vez que o campo é mais sensível à variação dos parâmetros, e o nível de ruído ser inferior. Por outro lado, também aumentam os problemas de desajuste de modelo devido ao menor comprimento de onda.

II. TEORIA

A. A função objectiva

A Tomografia Acústica Oceanica poderá ser colocada como um problema de optimização, que é encontrar o vector de parâmetros $\underline{\theta}$ que maximiza uma função objectiva. Uma função objectiva utilizada frequentemente é o processador multi-frequências incoerente, também conhecido por processador de Bartlett, e que é definido como

$$P(\underline{\theta}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \underline{p}^H(\underline{\theta}, \omega_n) \hat{\mathbf{C}}_{XX}(\omega_n) \underline{p}(\underline{\theta}, \omega_n). \quad (1)$$

O factor $\hat{\mathbf{C}}_{XX}(\omega_n)$ é uma estimativa da matriz de correlação obtida para o campo acústico observado à frequência ω_n , N é o número de frequências, e \underline{p} é o vector replica para ajustar com os dados. Todos os factores na equação (1) têm norma igual a 1, sendo o valor máximo que $P(\underline{\theta})$ pode atingir igual a 1.

B. Funções ortonormais empíricas

Um dos objectivos principais de OAT é a estimativa da temperatura da coluna de água do oceano. A estimativa directa do perfil de temperatura seria a aproximação mais simples, uma vez reflectiria directamente os parâmetros desejados. No entanto, em geral um perfil de temperatura contém um número de pontos elevado, pelo que a estimação directa de tais valores seria uma tarefa enorme. Uma forma eficiente de representar o perfil de temperatura é através de uma expansão de funções ortonormais empíricas (ing. Empirical Orthonormal Functions, EOF). Se existirem dados históricos, então uma parametrização eficiente em termos de EOF conduz a uma convergência mais rápida e maior unicidade na solução uma vez que uma grande quantidade de informação está disponível e a procura é executada próxima da solução. As EOF são obtidas através de uma decomposição em valores singulares (SVD) de uma matriz \mathbf{C} de colunas

$$\underline{C}_i = \underline{t}_i - \bar{\underline{t}}, \quad (2)$$

onde \underline{t}_i são os perfis medidos disponiveis, e $\bar{\underline{t}}$ é o perfil médio. A SVD é dada por

$$\mathbf{C} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}, \quad (3)$$

onde \mathbf{D} é uma matrix diagonal contendo os valores singulares, e \mathbf{U} é a matrix com colunas ortogonais, as quais são utilizadas como EOF. O perfil de temperatura é obtido por

$$\underline{T}_{\text{EOF}} = \bar{\underline{t}} + \sum_{n=1}^N \alpha_n \underline{U}_n, \quad (4)$$

onde \underline{U}_n é a n^{esima} EOF, e N é o número de EOF a combinar, de forma a representar com exactidão o perfil para o problema em mão. Em geral, é utilizado um critério baseado na energia total contida

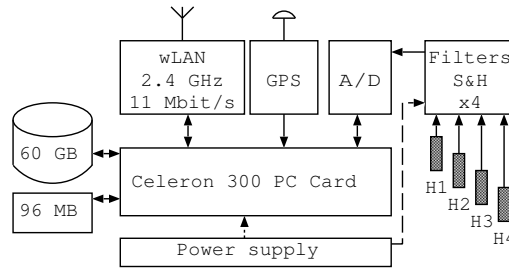


Fig. 1. Esquema de blocos representando a Bóia Acústica Oceanográfica.

nas N primeiras EOF, que poderá ser definido por

$$\hat{N} = \min_N \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N \lambda_n^2}{\sum_{m=1}^M \lambda_m^2} > 0.8 \right\} \quad (5)$$

onde os λ_n são os valores singulares obtidos através da decomposição em valor e vectores singulares, M é o número total de valores singulares, sendo que $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M$.

Os coeficientes α_n da equação (4), são tratados como parâmetros desconhecidos e são incluídos no espaço de procura, isto é, são procurados como parâmetros livres.

III. REALIZAÇÕES TECNOLÓGICAS: BÓIA ACÚSTICA OCEANOGRÁFICA

A *Bóia Acústica Oceanográfica* (ing. Acoustic Oceanographic Buoy, AOB) é um dispositivo de recepção acústica ligeiro cujo desenvolvimento foi iniciado no âmbito do projecto LOCAPASS financiado pelo Ministério da Defesa Nacional, com continuidade no âmbito do project AOB-JRP em colaboração com o NATO Undersea Research Centre (NURC) e outras instituições europeias.

A AOB incorpora tecnologia de última geração para adquirir, guardar, e processar sinais acústicos e não-acústicos recebidos em vários canais ao longo de uma antena vertical linear, representando uma evolução de um sistema anterior que já possuía algumas destas características, mas que apresenta como problema principal as suas dimensões, que a tornam difícil de operar (ver ref. [12]). As características físicas da AOB, em termos de tamanho, peso e autonomia tenderão para os valores de sono-bóias padrão, contudo, com capacidade de armazenamento local de dados, processamento, e transmissão *online*. A transmissão de dados é assegurada pela integração da bóia numa rede wireless LAN, o que poderá permitir levar a cabo tomografia em rede até distâncias de 10 ou 20 km. No primeiro protótipo a bóia dispõe de apenas quatro canais acústicos. A largura de banda do sistema atinge os 15 kHz o que permitirá a sua utilização noutras aplicações, tais como, sonar activo ou comunicações submarinas.

Na figura 1 é mostrado um esquema simplificado do dispositivo. O núcleo da AOB consiste de uma placa de PC baseada num Celeron 300 MHz com 256 MByte de memória RAM, um chip disk de 96 MByte contendo o sistema operativo, e um outro disco rígido de 60 GB para armazenamento de dados, conectores de saída para uma placa ethernet de 10/100 Mbit/s, USB, portas série e paralela, conectores para video, rato e teclado para monitorização e configuração. Foi adoptada uma arquitectura PCI/ISA (PISA) de forma a acomodar três outras placas: placa GPS para temporização com precisão de $1 \mu\text{s}$ e localização da bóia; uma interface PCI para uma placa wireless LAN PCMCIA de 11 Mbit/s; e uma placa de conversão ADC rápida de 16 bit para os canais acústicos. Os canais acústicos são conduzidos aos respectivos filtros *sample and hold*, que por sua vez são capturados pelo conversor ADC.

A bóia tem um corpo cilíndrico em aço com tampas de nylon no topo e no fundo através dos quais os componentes internos podem ser acedidos via conectores à prova de água. Para evitar que o equipamento electrónico seja danificado durante a colocação na água, o sistema foi desenhado para ser colocado desligado e ligar automaticamente ao fim de 2.5 minutos.

O protótipo da AOB foi testado pela primeira vez na campanha MREA'03 que teve lugar a norte da Ilha de Elba em Junho de 2003 em colaboração com o NURC. O teste foi realizado com sucesso, pelo que foi possível fazer aquisições contínuas em dois dias. Desde de então foram introduzidas algumas facilidade como o aumento do número de canais acústicos para oito, monitorização da carga de baterias disponível, controlo de horários de aquisição, e sinalização sincronizada das emissões acústicas, entre outros. Em Abril de 2004 foi de novo feito uso experimental durante a campanha MREA'04 que desta vez teve lugar junto ao Cabo Espichel também em colaboração com o NURC.

IV. TOMOGRAFIA ACÚSTICA OCEANICA E A CAMPANHA INTIFANTE'00

A. A campanha experimental INTIFANTE'00

A campanha de mar INTIFANTE'00 foi realizada numa zona próxima de Setúbal situada aproximadamente a 50 km a sul de Lisboa, durante o período de 9 a 29 de Outubro do ano 2000. As principais instituições envolvidas foram o SiPLAB, responsável pelo sistema de aquisição e controlo da fonte acústica; o Instituto Hidrográfico de Lisboa, que executou observações oceanográficas e disponibilizou o navio NRP D. Carlos I; o Instituto Superior Técnico de Lisboa, responsável pelas comunicações de alta frequência. Outras instituições em colaboração foram o NURC, que emprestou a fonte acústica, e Ente Nazionale per l'Energia ed l'Ambiente (ENEA) que participou em medições hidrológicas.

O campanha experimental serviu vários propósitos - um, entre outros, era o da tomografia acústica por longos períodos de observação de transmissões contínuas em ambiente de forte variabilidade. O *Evento 2* foi planeado para tal propósito e os resultados apresentados nesta secção serão unicamente sobre esta porção de dados.

A area experimental era um quadro rectangular situado na margem da plataforma continental com profundidades a variar entre 60 e 140 m. na figura 2 está representado um mapa batimétrico com a parte norte do quadro rectangular. A figura mostra o caminho de navegação levado a cabo pelo NRP D. Carlos I durante o Evento 2 no percurso NW, que representa o caminho de propagação entre a fonte acústica rebocada pelo navio e a antena vertical de 16 hidrofones ancorada no ponto ULVA. A batimetria ao longo do percurso NW é considerada como independente da distância com uma profundidade média de 118.7 m.

O NRP D. Carlos I partiu do ponto ULVA após o meio-dia do dia juliano 289 e navegou a uma velocidade constante de 1.2 nós ao longo do percurso NW durante 2 horas. A distância medida por GPS máxima foi aproximadamente de 6 km, mas na maior parte do tempo a distância foi de ca. 5.8 km. A abertura acústica da antena vertical estava entre 30 e 90 m. A forma de onda emitida foi um sinal frequência linearmente modulada de 2 s na banda de 170 a 600 Hz com um tempo de repetição de 10 s.

Durante a campanha foram feita medições com os termistores disponíveis na antena vertical e por XBT. Na figura 2 são mostrados os pontos designados por **X** onde o pessoal da ENEA lançou os XBT. As medidas de XBT foram realizadas a cada 3 horas durante aproximadamente 2 dias. As temperaturas medidas por XBT foram utilizadas neste estudo para o cálculo das EOF. Na figura 3(a) são mostrados os perfis de temperatura medidos e o perfil médio, e na figura 3(b) são mostradas as EOF obtidas.

B. O modelo ambiental

Para qualquer problema de inversão em acústica submarina, a escolha de um model ambiental capaz de representar as propriedades do canal de propagação é de importância fundamental. Esse modelo é normalmente designado por modelo de partida (ing. baseline model) e em geral inclui a informação *a priori* disponível para o problema em mão. Para o caso presente foi escolhido um modelo típico de três camadas com a coluna de água sobre a camada de sedimentos e uma camada de fundo, todos assumidos independentes da distância, como se pode ver na figura 4. Para as

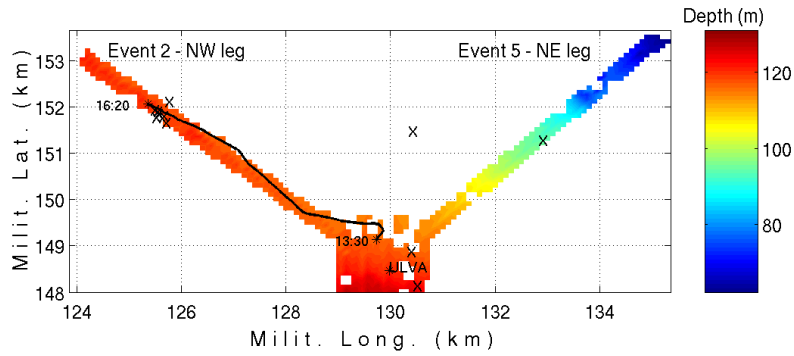


Fig. 2. Batimetria do sítio onde teve lugar a campanha INTIFANTE'00 com indicação dos pontos onde foram feitas as medidas de XBT através dos X.

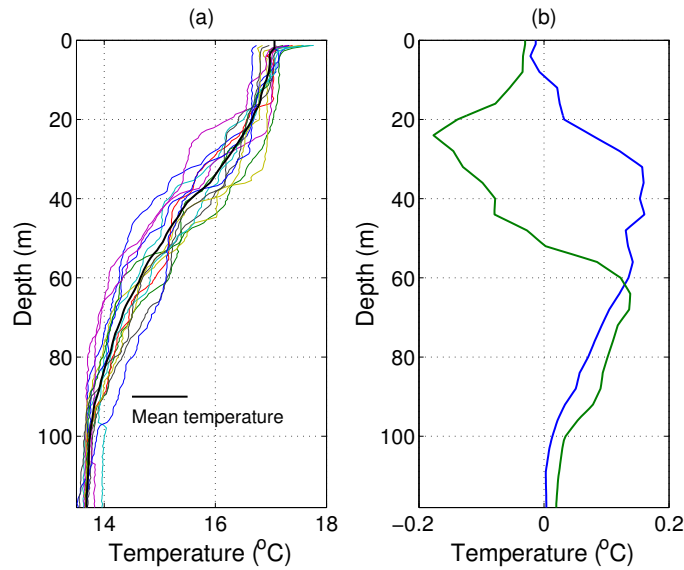


Fig. 3. Perfis de temperatura medidos durante o INTIFANTE'00 por XBT (a). Funções ortogonais empíricas obtidas através dos perfis de temperatura medidos por XBT (b).

propriedades geoacústicas foram escolhidos valores genéricos, uma vez que não houve medidas *in situ*. Em termos de problema directo os parâmetros foram divididos em subconjuntos relativos à coluna de água, geometria e geoacústica. O modelo de propagação acústica utilizado para o cálculo das replicas é o modelo de modos normais C-SNAP [13].

C. Focalização aplicada à tomografia acústica oceânica

O problema de estimação presente representa um caso onde múltiplos parâmetros são assumidos desconhecidos ou parcialmente conhecidos. Portanto vários parâmetros deverão ser otimizados simultaneamente com o fim de ajustar o modelo aos dados via focalização ambiental proposto por Collins *et al.* [6]. A coluna de água representada pelos coeficientes de EOF é variante no tempo, tal como a posição da fonte devido ao movimento do navio, a inclinação da antena e profundidade dos receptores devido à maré externa. Finalmente, adoptando o espírito do procedimento de focalização, foi decidido ter em conta a incerteza das propriedades do fundo do oceano, com vista à melhoria do ajuste do modelo. Na table I são indicados os parâmetros procurados com respectivos intervalos de procura e quantização. Em OAT é assumido que se procura a distância e a profundidade da fonte tendo em conta o conhecimento acerca da amplitude da variação da posição, uma vez que esses parâmetros podem ser controlados pelo experimentador. No estudo presente é assumido que

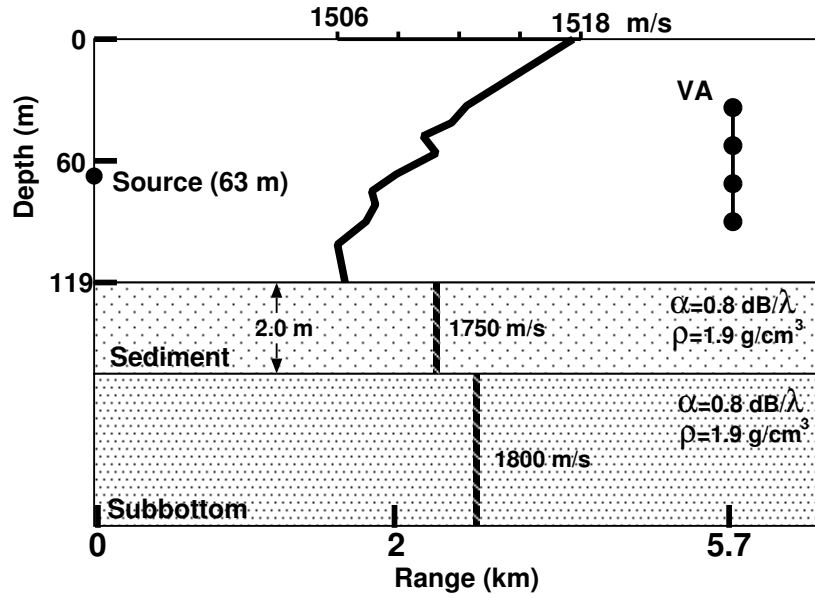


Fig. 4. Modelo de partida para o Evento 2. Todos os parâmetros são assumidos como independentes da distância.

Model parameter	min.	max.	Quantização
Temperatura			
α_1 ($^{\circ}\text{C}$)	-5	5	32
α_2 ($^{\circ}\text{C}$)	-5	5	32
Geométricos			
dist. fonte (km)	5.4	6.1	128
prof. fonte (m)	60	90	32
prof. receptor (m)	85	95	32
inclinação (rad)	-0.045	0.045	
Sedimento			
velocidade (m/s)	1520	1680	32
espessura (m)	1	7	16
Fundo			
velocidade (m/s)	1	200	32

TABELA I

PARÂMETROS DE PROCURA COM RESPECTIVOS INTERVALOS DE PROCURA E QUANTIZAÇÃO. A VELOCIDADE NO FUNDO ESTÁ ACOPLADA À VELOCIDADE NO SEDIMENTO.

se sabe pouco sobre a posição da fonte, daí os intervalos de procura serem alargados. Dado que as variações da maré na zona da experiência são elevadas, também é incluída informação sobre o nível da maré utilizando um modelo de predição tomando como referência a profundidade de 118.7 m [14].

Embora uma grande quantidade de informação *a priori* seja utilizada para reduzir o espaço de procura, a dimensão do espaço de procura ainda é da ordem de 10^{14} , o qual pode ser coberto através do uso de um algoritmo genético (GA) para reduzir significativamente o número de modelos a calcular. O GA é uma implementação proposta por Fassbender [15].

Foram obtidos resultados por OAT para o Evento 2. A inversão mostrada na figura 5 foi levada a cabo utilizando o processador convencional da equação (1). A coluna da esquerda contém as estimativas dos α_i (curvas mais espessas) juntamente com uma interpolação das medidas obtidas

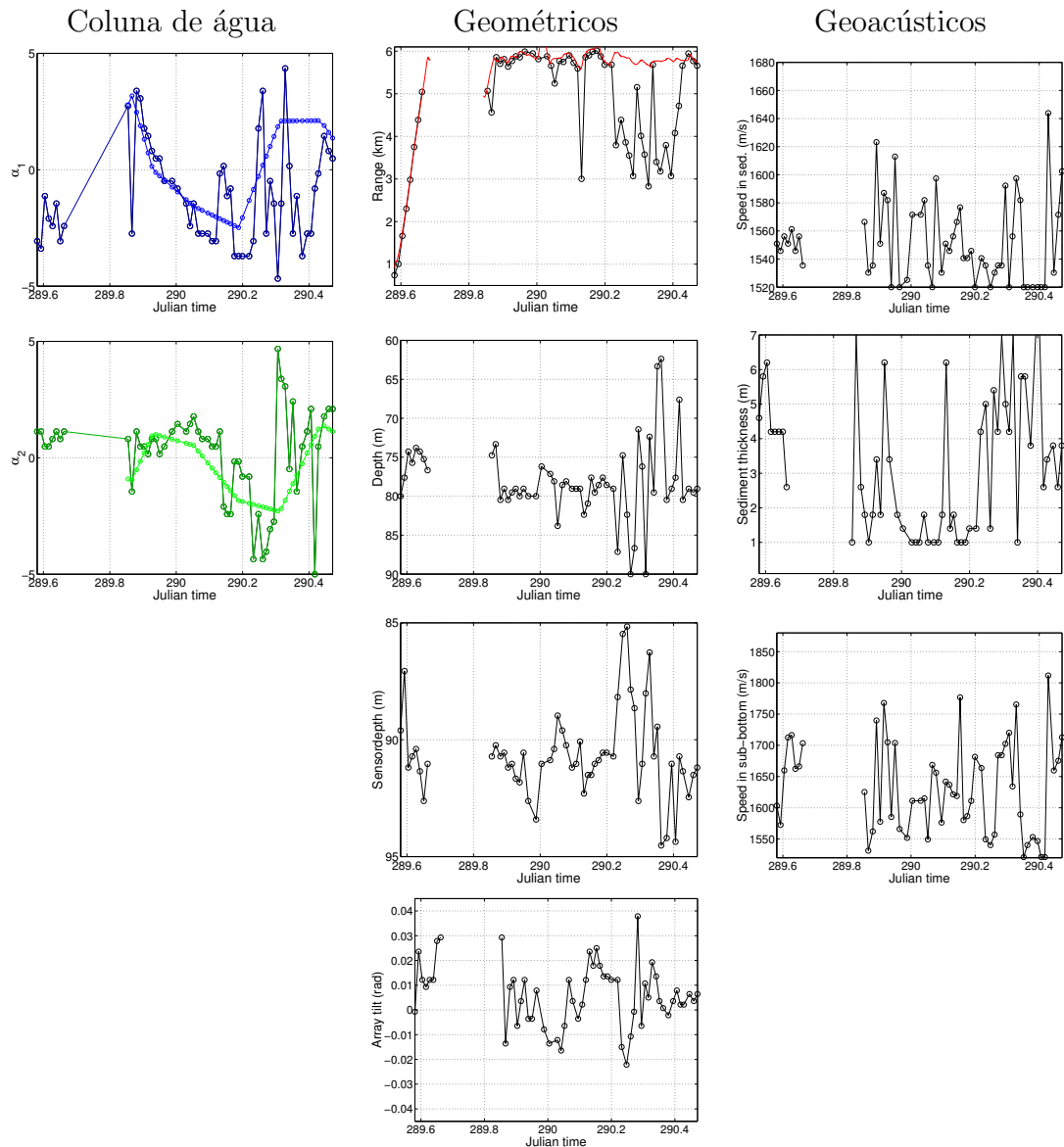


Fig. 5. Resultados de focalização obtidos para o Evento 2.

através da projecção dos perfis de XBT no subespaço das EOF (curvas menos espessas). Observa-se que os α_i são razoavelmente estimados no início do evento, mas que progressivamente existe uma descolagem das estimativas relativamente às medidas, sendo verificado o maior erro ao tempo 290.25. A partir daí as estimativas dos α_i começam a convergir para os valores medidos. Quanto aos parâmetros geométricos verifica-se que em geral a fonte é localizada correctamente durante uma grande parte do evento. Na parte inicial vê-se que o movimento da fonte a caminho da estação pode ser seguido praticamente na perfeição tanto em distância como em profundidade. Depois durante a recepção na estação volta a observar-se problemas: no intervalo entre 290.2 e 290.4 a localização é completamente perdida. Quanto aos parâmetros geoacústicos, as suas estimativas têm um comportamento bastante caótico, pelo que são pouco credíveis.

O facto mais importante é a inversão decorrer de forma satisfatória durante o período inicial e a partir de dada altura o processo de inversão começa a sofrer uma gradual degradação. Neste ponto a questão principal é encontrar uma explicação para tal ocorrência. Do ponto de vista do sistema (de propagação) a questão é: que alterações no sistema poderão ter levado a uma degradação tão forte na qualidade dos resultados de estimação obtidos?

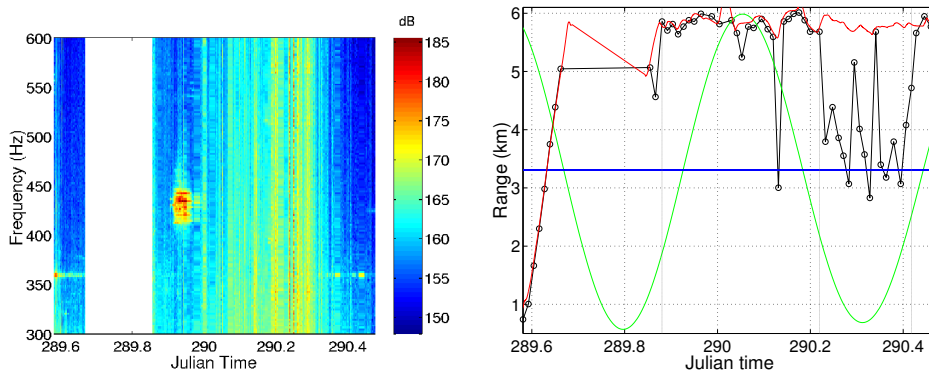


Fig. 6. Densidade espectral do ruído estimada no hidrofone 1 (a). Sobreposição da estimativa da distância da fonte com a força da maré predicta. (b)

Na figura 6(a) pode-se ver um gráfico que mostra a estimativa da densidade espectral do ruído ao longo do tempo no hidrofone 1. Pode-se ver como é forte a variação do nível ao longo do tempo. Mesmo na banda acima de 500 Hz é possível verificar-se uma variação entre 150 e 180 dB, o que se traduz por uma variação muito elevada. O importante neste aspecto é que existe uma coincidência temporal da variação do nível da potência do ruído com a qualidade dos resultados. Por outro lado põe-se uma questão relativamente à causa. Na figura 6(b) pode-se ver uma sobreposição do gráfico da estimação da distância da fonte acústica com a derivada do nível da maré predicta utilizando o modelo de marés. Pretende-se verificar se é a força da maré que está na origem de tal potência do ruído. O que se verifica é que efectivamente os erros na estimativa da posição da fonte são muito superiores durante o intervalo delimitado pelas linhas verticais, no qual a força da maré apresenta um pico. Esta análise poderá indicar que as fortes correntes que se verificam durante a mudança de maré arrastem a antena que está ancorada, induzindo um forte nível de ruído.

V. AVALIAÇÃO AMBIENTAL RÁPIDA E A CAMPANHA MREA'03

A tomografia acústica oceânica pode trazer avanços interessantes a uma técnica conhecida por *Avaliação Ambiental Rápida* (ing. Rapid Environmental Assessment, REA) na perspectiva de resultados de inversão acústica poderem ser assimilados em modelos de circulação oceânica adaptados e calibrados à escala da área sob observação. Os sistemas de tomografia oceânica tradicionais não estão bem adaptados para REA acústico (AREA) uma vez que requerem antenas receptoras longas e bem populadas de receptores. Para tornar AREA operacional, é necessário que o dispositivo utilizado na recepção dos sinais acústicos sejam ligeiros e fáceis de operar. AREA deverá estar em condições de assimilar conhecimento ambiental *a priori* tal como propriedades do fundo, batimetria, ou dados telemétricos como posição GPS ou profundidade da fonte. Uma outra componente, intimamente ligada ao processo de inversão, é toda uma colecção de técnicas vindas processamento de sinal e de antenas, utilizadas de forma estimar os parâmetros de forma eficiente.

De forma a responder aos requisitos acima referidos, um conceito inovador está a ser proposto no âmbito de um projecto conjunto com o NURC, que formalmente começou no início de 2004, chamdo AOB-JRP¹ O conceito inclui o desenvolvimento de métodos de estimação capazes de obter propriedades ambientais verdadeiras de sinais acústicos recebidos numa rede de bóias oceanográficas acústicas derivantes. Um protótipo de uma AOB (ver secção III) e um programa de inversão preliminar foram testados durante a campanha Maritime Rapid Environment Assessment'2003 sea trial (MREA'03). Resultados obtidos a bordo do navio já publicados [16] serão descritos aqui de forma resumida.

¹o projecto AOB-JRP foi submetido conjuntamente pelo SiPLAB da Universidade do Algarve, Universidade Livre de Bruxelas, Instituto Hidrográfico de Lisboa (IH), e a Royal Netherlands Naval College (RNLNC).

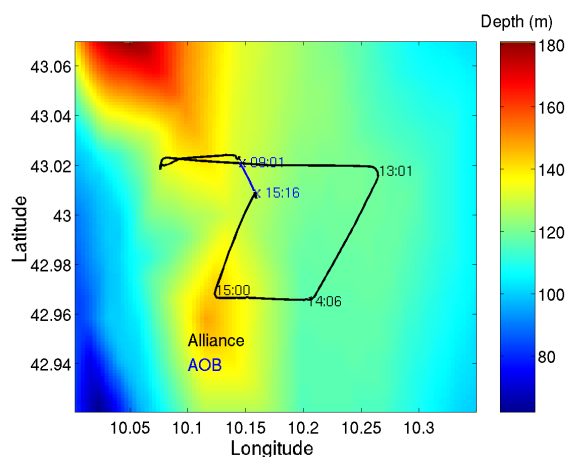


Fig. 7. Navegação da fonte acústica e AOB obtida por GPS durante o lançamento do dia 21 de Junho.

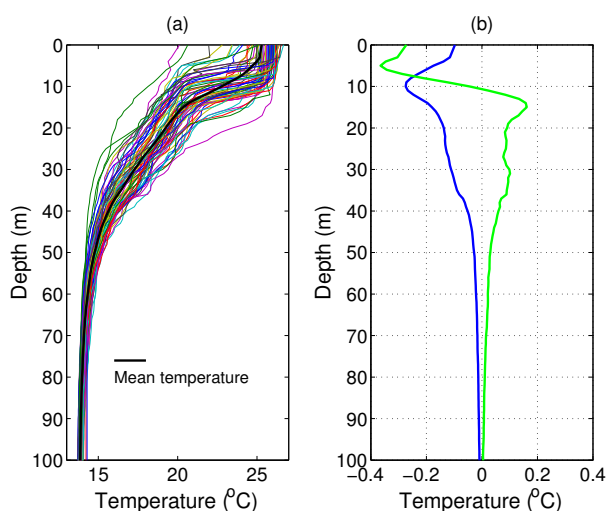


Fig. 8. Perfis de temperatura medidos durante os dias 16, 17 e 19 de Junho. Perfil médio mostrado através da curva espessa (a); as duas primeiras Funções Ortogonais Empíricas (b).

A. A campanha MREA '03

A campanha MREA'03 teve lugar a norte da Ilha de Elba durante o mês Junho de 2003 envolvendo o navio R/V Alliance. A AOB foi lançada a 21 de Junho em condições climatéricas muito favoráveis numa zona de dependência com distância ligeira. A figura 7 mostra a geometria emissor-receptor estimada através dos registos obtidos por GPS. A distância emissor-receptor variou entre 0.5 e 9 km. A variabilidade batimétrica atingiu 20 m nalguns dos caminhos de propagação, sendo a profundidade na posição da fonte ca. de 120 m e a profundidade máxima de 140 m na posição da fonte acústica. A fonte acústica foi lançada do navio R/V Alliance a uma profundidade variável entre 60 e 100 m de profundidade, dependendo da velocidade do navio. As emissões consistiram de LFM's em duas bandas, uma inferior (500-800 Hz), outra superior (900-1200 Hz), com a duração de 2 s.

Para obtenção de informação *a priori* foram feitas medidas de CTD antes e depois do lançamento da AOB. Pela sua relevância para o problema em mão os perfis de temperatura medidos nos dias 16, 17 e 19 de Junho estão mostrados na figura 8(a), juntamente com as duas primeiras EOF 8(b), que explicam 80% da variabilidade da temperatura durante este período.

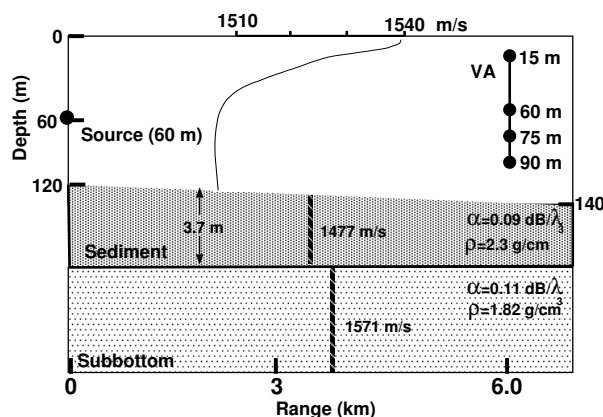


Fig. 9. Modelo de partida para a campanha MREA'03. Todos os parâmetros são independentes da distância excepto a profundidade da água.

B. Tomografia acústica e localização

Durante a campanha de mar foi experimentada uma inversão acústica ainda a bordo do navio utilizando os dados adquiridos no dia 21 de Junho. O modelo de partida utilizado é mostrado na figura 9 onde estão indicadas as profundidades às quais se encontram os receptores, e se pode ver a que é assumida uma batimetria dependente da distância. Os parâmetros geoacústicos foram estimados num estudo prévio com dados da mesma zona [10]. Para resolução do problema directo foi utilizado o modelo de modos normais C-SNAP.

As inversões foram levadas a cabo nas duas bandas, tendo sido tomados dados a cada 10 minutos os dados de banda inferior e a cada 20 minutos para os dados de banda superior. Para cada inversão foram utilizadas 22 frequências equiespaçadas e 10 emissões para formar a matriz de densidade espectral. Para efectuar a optimização foi utilizado um algoritmo genético, e os parâmetros incluídos no espaço de procura foram os parâmetros geométricos (distância, profundidade, profundidade do receptor, inclinação) e dois coeficientes para a expansão em EOF. A posição da fonte é assumida como sendo conhecida pelo que a procura da fonte é feita em intervalos de procura muito reduzidos e centrados nos dados telemétricos.

As estimativas das temperaturas obtidas são mostradas na figura 10. Pode ser observado que os perfis obtidos na banda inferior têm uma variabilidade muito elevada resultando em estimativas improváveis ao longo do tempo (curvas azuis). As estimativas da temperatura à superfície variam entre 21 e 30 °C, o que é muito improvável mesmo que a variabilidade espacial e temporal seja considerada. Por outro lado, as estimativas obtidas na banda superior é claramente inferior (curvas encarnadas), sendo que estas variam entre 23 e 26.5°C². Contudo mesmo assim os α_i mostram variações pouco prováveis. Na ref. [16] é feita uma análise no sentido de compreender o desafio colocado. É mostrado que com 4 hidrofones a unicidade do campo acústico no plano α_1 - α_2 é baixa, ou seja, existe um forte padrão de ambiguidade. Para além disso mostra-se que o ruído diminui 7 dB entre 500 e 1200 Hz, o que poderá explicar a maior robustez nos resultados obtidos na banda superior.

Na execução de OAT levada a cabo acima, foi assumido que a localização da fonte era conhecida com elevado grau de exactidão, pelo que foram escolhidos intervalos de procura muito reduzidos. Então a possibilidade de falhar a localização da fonte é artificialmente restringida, tornando-se incerto se o modelo físico está de acordo com a realidade. Um teste de validade do modelo físico poderá ser efectuado como problema de localização uma vez que os parâmetros de localização são parâmetros de grande importância em termos de resposta acústica. Portanto, se o modelo

²as temperaturas de superfície dos dados de CTD mostrados na figura. 8 variam entre 25 e 27°C.

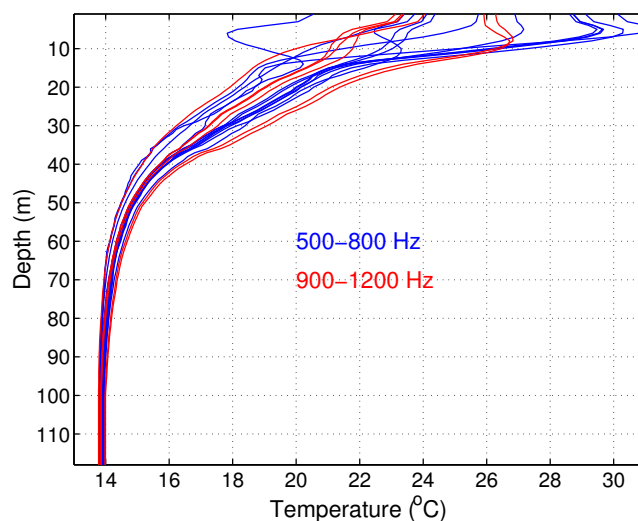


Fig. 10. Resultados de inversão para a temperatura do oceano nas duas bandas: 500-800 Hz (azul); 900-1200 Hz (encarnado).

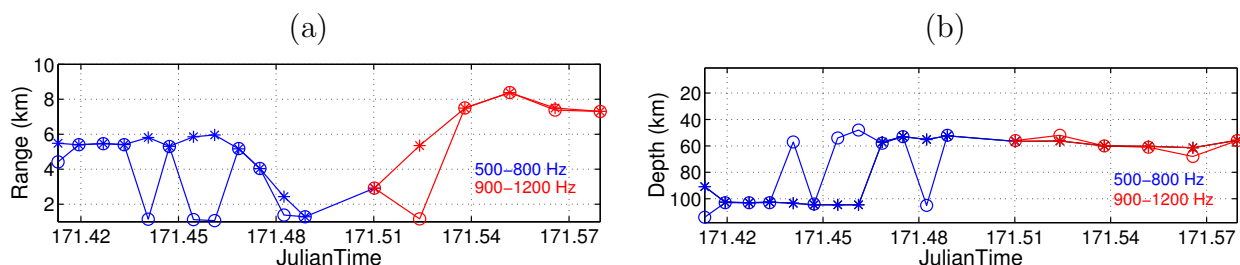


Fig. 11. Localização utilizando parâmetros ambientais estimados: distância(a); profundidade (b). (*) estimativas com GA e intervalos reduzidos; (o) estimativas de localização.

ambiental não estiver correctamente estimado, então, em princípio, a fonte também não poderá ser correctamente localizada com base nesse modelo físico.

Na figura 11 são mostradas as estimativas da posição da fonte utilizando os parâmetros previamente estimados. Os asteriscos indicam a posição estimada durante a inversão tomográfica, e os círculos as estimativas em distância e profundidade. Para a banda inferior houve 5 erros graves em 12, enquanto que para a banda superior se obteve um resultado bem melhor com apenas um erro grave em 6 casos.

Em princípio deveria ser possível descartar os modelos incorrectos através deste teste. Contudo, não foi possível associar sistematicamente desajustes no modelo aos erros cometidos na localização. No caso presente, a relação entre o pico principal e os picos secundários é tão baixa que pequenos erros de modelo ou ruído poderão fazer com que o máximo *salte* para um pico secundário. Por outro lado, o campo acústico poderá não ser sensível a determinados erros aparentemente significativos, tais como os erros de estimação da temperatura à superfície, tal que o pico apareça no local correcto.

VI. CONCLUSÃO

O MFP é actualmente uma técnica com um elevado grau de maturidade com aplicação em casos reais. Contudo, a sua utilização em casos de alta operacionalidade e com requisitos reduzidos permanece um desafio.

Neste artigo foi feita uma revisão de conceitos básicos relacionados com MFP, começando por se referir a importância da introdução dos modelos de propagação no processo de estimação de parâmetros. Depois foi feita uma introdução ao Processamento por Ajuste de Campo (MFP) e

métodos baseados em MFP como a Tomografia Acústica Oceânica, uma revisão histórica da origem deste métodos e de alguns princípios básicos.

Recentemente, o SiPLAB iniciou uma incursão no mundo das realizações técnicas tendo começado por introduzir modificações num sistema de recepção de geração anterior, ao introduzir a capacidade de armazenamento local de dados e de comunicar via wireless LAN, e posteriormente ter conduzido o desenvolvimento de um segundo sistema de recepção de sinais acústicos mais ligeiro com o fim de diminuir significativamente o tamanho e com isso obter uma maior operacionalidade.

Finalmente, são apresentados resultados experimentais obtidos no âmbito de duas campanhas de mar. Durante a campanha INTIFANTE'00 o objectivo foi adquirir dados para aplicação da tomografia acústica ao longo de longo períodos de observação utilizando uma antena de captadores ancorada. Os resultados demonstram que é possível obter resultados de qualidade, ainda que existam problemas que não estão completamente resolvidos. Nomeadamente a questão do ruído pode ser, em parte, vista como uma questão de configuração do sistema. A campanha MREA'03 teve como propósito a recolha de sinais acústicos com o objectivo de realizar tomografia acústica para servir de entrada para um processo de Avaliação Ambiental Rápida. Os resultados apresentados são preliminares visto que a inversão em tempo real ou semi-real é uma prática de pouca rotina. Ainda assim são bastante satisfatórios, visto sobretudo pelo facto serem encorajadores no sentido de utilizar sinais em bandas de frequências superiores. Na banda superior foi possível localizar correctamente a fonte em movimento a uma distância próxima de 9 km.

REFERÊNCIAS

- [1] A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, and P. N. Mikhalevsky. An Overview of Matched Field Methods in Ocean Acoustics. *IEEE J. Ocean Eng.*, 18:401–424, 1993.
- [2] H. P. Buckner. Use of calculated sound fields and matched-detection to locate sound source in shallow water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 59:368–373, 1976.
- [3] M. J. Hinich. Maximum-likelihood signal processing for a vertical array. *J. Acoust. Soc. Am.*, 54:499–503, 1973.
- [4] R. M. Hamson and R. M. Heitmeyer. An analytical study of the effects of environmental and system parameters on source localisation in shallow water by matched-field processing of a vertical array. *J. Acoust. Soc. America*, 86:1950–1959, 1989.
- [5] S. Jesus. Normal-mode matching localization in shallow water: environmental and system effects. *J. Acoust. Soc. America*, 90:2034–2041, 1991.
- [6] M. D. Collins and W. A. Kuperman. Focalization: Environmental focusing and source localization. *J. Acoust. Soc. America*, 90:1410–1422, 1991.
- [7] A. M. Richardson and L. W. Nolte. *A posteriori* probability source localization in an uncertain sound speed deep ocean environment. *J. Acoust. Soc. America*, 89:2280–2284, 1991.
- [8] D. F. Gingras and P. Gerstoft. Inversion for geometric parameters in shallow water: Experimental results. *J. Acoust. Soc. America*, 97:3589–3598, 1995.
- [9] P. Gerstoft and D. F. Gingras. Parameter estimation using multi-frequency range-dependent acoustic data in shallow water. *J. Acoust. Soc. America*, 99:2839–2850, 1996.
- [10] C. Soares, A. Waldhorst, and S. M. Jesus. Matched-field processing: environmental focusing and source tracking with application to the North Elba data set. In *Oceans'99 MTS/IEEE Proceedings*, volume 3, pages 1598–1602, Seattle, 1999.
- [11] C. Soares, M. Siderius, and S. M. Jesus. Source localization in a time-varying ocean waveguide. *J. Acoust. Soc. America*, 112:1879–1889, 2002.
- [12] P. Felisberto and S. M. Jesus. Mapeamento espacial de perturbações da temperatura do oceano por integração sistemática de dados acústicos e medições *in-situ*. In *Actas Colóquio Jornadas do Mar 2004*, Lisboa, 2004.
- [13] C. M. Ferla, M. B. Porter, and F. B. Jensen. C-SNAP: Coupled SACLANTCEN normal mode propagation loss model. Memorandum SM-274, SACLANTCEN Undersea Research Center, La Spezia, Italy, 1993.
- [14] R.D. Ray, B.V. Sanchez, and D.E. Cartwright. Some extensions to the response method of tidal analysis applied to topex/poseidon altimetry. *EOS Trans.*, 75, 1994.
- [15] T. Fassbender. Erweiterte Genetische Algorithmen zur globalen Optimierung multimodaler Funktionen, 1995.
- [16] C. Soares, S. M. Jesus, A. J. Silva, and E. Coelho. Acoustic oceanographic buoy testing during the mrea'03 sea trial. In *Proc. of the European Conference of Underwater Acoustics*, Delft, The Netherlands, July 2004.