

A. Silva¹S. Jesus²¹Área Eng. Elect.
EST/UAlg²Área Eng. Elect.
e Comp.
UCEH/UAlg

Influências do Ambiente Submarino nas Comunicações Digitais

1ª PARTE: BREVE INTRODUÇÃO À ACÚSTICA SUBMARINA
E AOS MODELOS DE MODOS NORMAIS

1. Introdução

Nos últimos anos tem-se assistido a um rápido aumento da pesquisa e desenvolvimento de sistemas de comunicação acústica submarina (UWA¹). Este crescente interesse aparece como fruto da necessidade de uma comunicação submarina sem fios, eficiente, para satisfazer novas aplicações.

Até há alguns anos, estas aplicações eram exclusivamente militares (sonar, detecção de submarinos e de minas, etc.). Recentemente, o interesse da indústria e da comunidade científica introduziu um novo leque de aplicações. Nestas novas aplicações destacam-se aquelas que requerem comunicações em tempo real e que por isso obrigam ao envio de grandes quantidades de informação em tempo útil, nomeadamente a comunicação com veículos autónomos submarinos, a implementação de redes locais de comunicação submarinas, a transmissão de imagens, a transmissão digital de voz e a instrumentação remota.

Também em Portugal, no Ano Internacional dos Oceanos e da EXPO 98, reconheceu-se a importância estratégica que têm para nós os oceanos. Nesse sentido, e através das resoluções do Conselho de Ministros 88 e 89 de 1998, decidiu o governo, através do Ministério da Ciência e Tecnologia, lançar um Programa Dinamizador das Ciências e Tecnologias do Mar, que esperamos venha a dar frutos nos próximos anos.

No sentido de contribuir para o aparecimento de literatura escrita em português sobre a problemática dos oceanos em geral e das comunicações acústicas submarinas em particular, vamos nesta e na próxima edição da Tecnovisão apresentar um artigo em duas partes sobre este tema. No primeiro vamos falar dos mecanismos que levam à formação do campo acústico e a sua simulação computacional. Na segunda parte iremos analisar a influência do meio ambiente nas comunicações digitais acústicas submarinas.

2. As Comunicações Acústicas Submarinas

A transmissão de ondas electromagnéticas debaixo de água é extremamente limitada, uma vez que são rapidamente absorvidas pelo meio ambiente. No entanto, as ondas sonoras propagam-se de forma razoavelmente eficaz, e o seu estudo na era moderna foi iniciado por Leonardo da Vinci. Para implementar sistemas de comunicação acústicos submarinos sem fios, começaram por se reverter as técnicas desenvolvidas para as comunicações via rádio. Mas devido às severas condições de propagação encontradas, nomeadamente a propagação por múltiplos caminhos e a fraca relação sinal/ruído, estes sistemas revelaram uma taxa efectiva de transmissão relativamente baixa. A necessidade de implementar sistemas de comunicação de alto débito levou ao aparecimento de novas soluções que fizeram das comunicações UWA um novo campo de aplicação da engenharia.

Estas novas soluções foram acompanhadas de uma extensa investigação no campo das comunicações e da oceanografia, onde se destaca o desenvolvimento de modelos geoacústicos de propagação acústica submarina. Muitas técnicas têm sido propostas para aumentar a taxa de transmissão dos sistemas de comunicação digital acústica submarinas e algumas delas serão referidas na segunda parte deste artigo. Mas o Homem quer sempre ir mais longe e as novas aplicações propostas exigem novos desenvolvimentos. O conhecimento relativamente fraco do processo de propagação do som nos canais acústicos submarinos faz com que ainda esteja tudo em aberto. Nestas condições a máxima performance que pode ser atingida nestes sistemas de comunicação ainda está longe de ser conhecida.

Devido a condições de propagação do som muito diferentes, os sistemas de comunicações podem distinguir-se entre os que operam em águas profundas, os que operam em águas pouco profundas (normalmente águas costeiras com profundidade até 200m) e os que operam debaixo de gelo. Na fig. 1 podemos ver exemplos típicos destes meios de propagação, em que a direcção de propagação do som é representada por raios perpendiculares à frente de onda.

¹Underwater acoustic

Neste trabalho iremos dedicar-nos em particular à propagação do som em águas pouco profundas (F na fig. 1).

medida do que é hoje tecnicamente possível, à *performance* real de um canal acústico submarino.

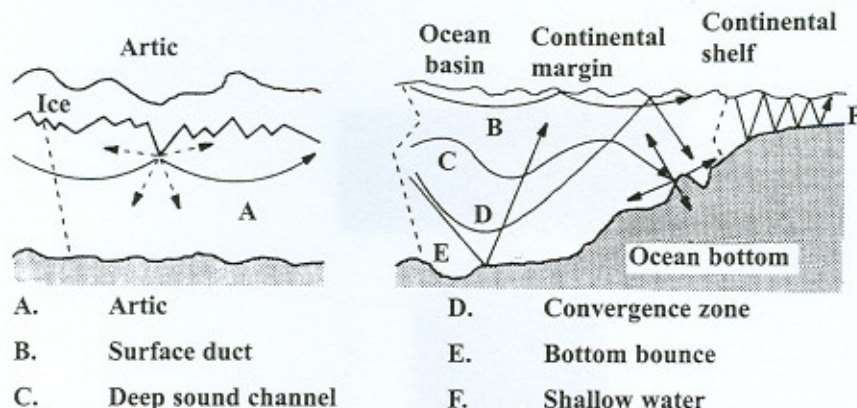


Fig. 1 - Vários tipos de caminhos de propagação do som no oceano (de ref. [2])

É aqui que a propagação mais interage com a superfície e o fundo do mar e por isso a influência da propagação por múltiplos caminhos mais se faz sentir. Neste contexto, a utilização da informação obtida *a priori* pelos modelos de propagação acústica submarina pode ser um factor determinante na concepção de sistemas de comunicações eficientes. O que se propõe é uma abordagem baseada em técnicas de processamento de sinal adaptadas ao modelo de propagação do meio. Esta técnica é também conhecida por *matched field processing* e tem sido extensivamente usada na localização de fontes.

A solução que pretendemos estudar, tem como ponto de partida a utilização da informação obtida *a priori*, pelos modelos de propagação acústica submarina. Estes modelos podem calcular uma estimativa determinista da resposta impulsiva do canal que pode depois ser usada num sistema de comunicação para detectar/estimar os sinais transmitidos. Neste sentido os modelos de modos normais têm algumas vantagens sobre os outros tipos de modelos, nomeadamente têm em conta as propriedades físicas da coluna de água e do fundo marinho, por forma a que o resultado com eles obtido seja semelhante, na

Na fig. 2 resumimos as características mais importantes do meio ambiente submarino, que é constituído por três níveis distintos: a coluna de água com profundidade H_0 , um nível de sedimento com espessura H_1 , e um subfundo (crosta terrestre) com profundidade considerada infinita.

A coluna de água tem características compressoriais e é caracterizada pela velocidade do som $c_0(z)$, que pode variar arbitrariamente com a profundidade, pela densidade ρ_0 e pela atenuação volumétrica β_0 , consideradas constantes com a profundidade. Os níveis de sedimento podem ser modelados como fluidos e tem por isso características análogas à coluna de água. O subfundo é sólido com características independentes da profundidade e além das propriedades compressoriais que existiam também nos níveis anteriores, possui propriedades transversais: velocidade transversal do som C_{2S} e atenuação transversal β_{2S} . A rugosidade da superfície, s_0 , e do fundo do mar, s_1 , afecta por dispersão a propagação do som e a sua influência está relacionada com a ordem de grandeza do comprimento de onda do sinal acústico utilizado.

Na prática, a utilização dos modelos acústicos deterministas está condicionada por dois aspectos:

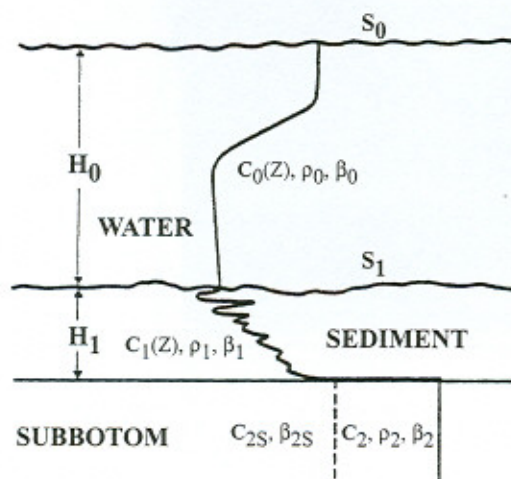


Fig. 2 - Propriedades físicas do meio ambiente (de ref. [1]) (com perfil de velocidade típico de verão).

- a precisão com que os parâmetros do meio ambiente são conhecidos e a sua influência no campo acústico;
- a variabilidade temporal da resposta impulsiva do canal.

Neste trabalho realizamos um estudo exaustivo sobre a sensibilidade da detecção de sinais emitidos aos erros de estimação dos parâmetros físicos do canal acústico submarino em águas pouco profundas. O sistema de comunicação e os resultados obtidos serão apresentados no próximo artigo.

3. Os modelos de modos normais

A propagação do som é o resultado do movimento das partículas de um determinado meio, gerado por uma fonte que vibra a uma determinada frequência. A vibração de uma partícula provoca a vibração das suas vizinhas através da pressão que exerce sobre elas. É por isso usual descrever a propagação acústica como a propagação de ondas de pressão.

Os modelos de propagação acústica têm por objectivo simular, em ambiente computacional, o fenómeno da propagação do som gerado por uma fonte num ambiente subaquático. O seu desenvolvimento pode ser encontrado nas ref. [1] a [6].

A propagação do som no oceano é descrita matematicamente pela equação de onda ref. [2] a [4], cujos parâmetros e condições de fronteira são reveladoras do complexo ambiente marinho. A grande limitação dos modelos são as rápidas variações dos parâmetros que afectam a propagação do som que dão aos canais acústicos submarinos um carácter variante no tempo.

Os modelos de modos normais são particularmente eficazes em águas pouco profundas e nas comunicações a grandes distâncias ou seja quando o canal acústico se aproxima de um guia de ondas.

Em águas pouco profundas, além das propriedades do volume de água, também as propriedades do fundo e da superfície influenciam decisivamente a propagação do som. Isto acontece porque o som sofre reflexões múltiplas na superfície e no fundo até atingir o receptor, o que implica a necessidade de um conhecimento muito preciso destas propriedades, para que os modelos possam prever o mais aproximadamente possível o campo acústico. Esta é também a razão da não utilização dos modelos traçadores de raios em águas pouco profundas, pois não permitem uma correcta descrição da superfície e do fundo marinho (fronteiras do guia de ondas).

3.1 Solução Modal

A solução modal aplica-se à equação de Helmholtz, ou equação de onda reduzida, que é a equação de onda quando consideramos uma fonte pontual isotrópica e monocromática

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \rho(z) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2(z)} p = \frac{\delta(z - z_s) \delta(r)}{2\pi r} \quad (1)$$

em que r representa a distância emissor receptor, z a profundidade, ω a frequência da onda, $c(z)$ a velocidade de propagação do som ao longo da coluna de água, $\rho(z)$ a densidade e $p = p(r, z)e^{-j\omega t}$ a onda de pressão acústica que se propaga no espaço e no tempo.

Esta equação pode ser resolvida pelo método da separação de variáveis, e após aplicação das condições de fronteira obtém-se a equação modal. A solução da equação modal é dada aproximadamente por

$$p(r, z) = \frac{i}{\rho(z_s) \sqrt{8\pi r}} e^{-i\pi/4} \sum_{m=1}^M Z_m(z_s) Z_m(z) \frac{e^{ik_m r}}{\sqrt{k_m}} \quad (2)$$

que é válida a uma certa distância da fonte e cuja dedução pode ser vista na ref. [4].

A equação modal tem um número infinito de soluções (modos) que são caracterizados por uma função $Z_m(z)$ que representa a forma dos modos e por uma constante horizontal de propagação k_m . As funções e as constantes são as funções próprias e os respectivos valores próprios da função modal. O número de modos que se propagam (modos discretos) é finito e igual a M , e o seu número depende em geral da frequência da fonte e dos parâmetros do meio ambiente. Tipicamente encontram-se ordenados de acordo com a relação

$$\frac{\omega}{c_b} \leq k_M < \dots < k_1 \leq \max \left[\frac{\omega}{c_w(z)}, \frac{\omega}{c_s(z)} \right] \quad (3)$$

Mecanismos de perdas

As perdas de transmissão podem ser causadas por absorção/amortecimento do som (na água, sedimento,...) ou por dispersão nas fronteiras.

A atenuação na água e nos sedimentos é normalmente obtida empiricamente e pode ser vista para alguns tipos de sedimentos na ref. [2].

A segunda causa de perdas referida é a dispersão nas fronteiras, normalmente caracterizada pelo valor eficaz (RMS^2) da rugosidade da interface e é incluída nos mecanismos de perdas por alteração das condições de fronteira.

Os mecanismos de perdas referidos fazem com que os

²Root mean square

valores próprios (números de onda) se tornem complexos, em que a parte imaginária é responsável pelo enfraquecimento dos modos (parte evanescente dos modos) o que implica uma diminuição da pressão acústica. Por outro lado, podemos considerar a parte real como responsável pela propagação dos modos ao longo do guia de ondas e assim pela propagação do campo acústico.

Modelo de modos normais para meios ambientes dependentes da distância

A solução de modos normais foi desenvolvida para ambientes *range independent*³. Para o caso *range dependent*, divide-se o meio ambiente em segmentos (fatias) e considera-se que as características de cada um desses segmentos são *range independent*. A solução *range dependent* é obtida usando a solução de modos normais, em cada um dos segmentos e acoplando os modos nas respectivas interfaces. A aproximação "modos acoplados" é apresentada na ref. [2].

3.2 Resultados Obtidos com os Modelos de Modos Normais

Os resultados obtidos com os Modelos de Modos Normais de propagação acústica submarina podem ser representados em termos de Perdas de Transmissão quando pretendemos ter uma ideia do Campo Acústico gerado por uma fonte monocromática e em termos de Resposta Impulsiva do canal acústico quando pretendemos modelar o efeito do canal sobre uma banda de frequências entre uma fonte e um receptor (com localização conhecida). Neste caso o canal acústico é aproximado como um filtro linear.

3.2.1 Campo Acústico

Normalmente os resultados obtidos para o campo de pressão acústica originado por uma fonte monocromática, em função da distância à fonte e da profundidade, são expressos em termos de Perda de Transmissão (TL) que é definida pela equação

$$TL(r,z) = -20 \log \left| \frac{p(r,z)}{p^0(r=1)} \right| \quad (4)$$

em que $p^0(r=1)$ representa a pressão acústica a um metro da fonte. A título de exemplo apresentamos nas figuras 3 e 4 os resultados de TL (em dB) obtidos por soma incoerente dos modos (mais apropriado para águas pouco profundas), para um meio ambiente com um perfil de velocidade típico de verão (ver fig. 2), para baixas e altas frequências, respectivamente. Este caso é típico em águas costeiras, em que a coluna de água é mais profunda junto à fonte e o som se propaga para águas menos profundas⁴. Trata-se por isso de um caso *range depen-*

dent e nele podemos verificar que:

- as frequências mais baixas penetram mais facilmente no fundo do mar;
- o perfil do som na coluna de água afecta muito mais as altas frequências, pois como facilmente se pode ver na fig.4, cria-se um poço de potencial na zona dos 40m (onde a velocidade do som é menor).
- apesar de a atenuação do som aumentar exponencialmente com a frequência, a 1,8Km não se nota grande diferença, em termos de TL, entre um caso e outro, isto deve-se ao facto de a altas frequências o guia de ondas ter um comportamento mais próximo do ideal, não deixando que a energia acústica se perca para o fundo.

AGUAS POUCO PROFUNDAS (TL,FS=100Hz) (v2c1)

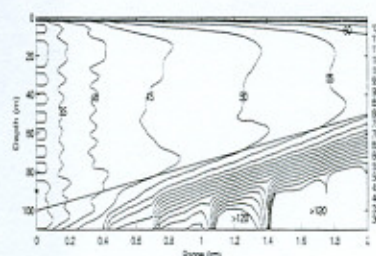


Figura 3- Campo Acústico gerado por uma fonte monocromática para baixas frequências, TL[dB].

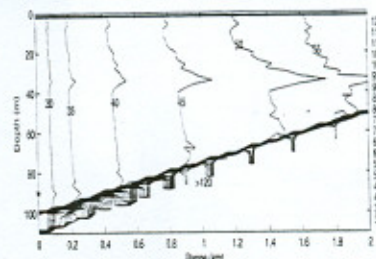


Figura 4 - Campo Acústico gerado por uma fonte monocromática para altas frequências, TL[dB].

3.2.2 Resposta Impulsiva

Nas comunicações acústicas submarinas pretendemos medir no receptor o sinal devido a uma fonte, nesta comunicação ponto a ponto o oceano pode ser considerado como um filtro aproximadamente linear e num determinado instante pode ser caracterizado pela sua Resposta Impulsiva (RI).

Normalmente para modelar o canal acústico (filtro) interessa-nos saber a RI numa determinada banda (estreita) na qual pretendemos fazer a nossa comunicação. Para tal podemos utilizar os modelos de modos normais calculando a sua resposta a sucessivas ondas monocromáticas

³Utilizamos os termos "range dependent" e "independent" por serem tecnicamente mais correctos

⁴Este caso é conhecido por up-slope.

de frequência $\omega_n = \omega_1 + n\Delta\omega$. Obtendo assim, por síntese de Fourier, a resposta em frequência do canal e a partir desta a RI.

As figuras 5 e 6 foram calculadas para uma banda estreita de 1.5kHz centrada nos 15kHz. Na primeira, a distância fonte receptor é de 506.3 metros e o sedimento é de lodo, na segunda a distância é de 724.4 metros e o sedimento é moraina.

A análise da RI para diferentes condições do meio ambiente de propagação é reveladora da influência das características do meio na alteração das condições de propagação. Na fig. 5 podemos ver que a RI é constituída por uma impulso principal seguido de outros impulsos secundários que são os responsáveis pelo fenómeno da interferência intersimbólica (ISI) nas comunicações digitais. Estas réplicas são devidas aos múltiplos caminhos seguidos pelo som para atingir o receptor (caminho directo e caminhos com reflexões na superfície e no fundo).

Comparando as fig. 5 e 6, podemos ver que devido a um endurecimento do sedimento, os picos secundários se tornam mais importantes em relação ao principal o que leva a um agravamento da ISI. Isto deve-se ao facto de que o endurecimento do sedimento permite que a propagação através deste se faça com menor atenuação. Por sua vez podemos ver que o aumento da distância entre a fonte e o receptor também leva a que a ISI se agrave devi-

do ao aumento do número de réplicas do impulso emitido.

As figuras 5 e 6 são reveladoras da importância do sedimento e da sua descrição pormenorizada, no cálculo computacional da RI de um canal acústico submarino, mesmo para altas frequências, para as quais até agora poderíamos pensar que a descrição do fundo do mar era de menor importância porque a penetração no sedimento das altas frequências é menor.

4. Conclusão

Os modelos de modos normais de propagação acústica submarina são um bom meio de descrever a propagação do som em ambiente oceânico. No entanto a sua utilização para fazer o *matched field processing* em tempo real está condicionada pelo tempo computacional de cálculo em particular para altas frequências em que o número de modos no campo acústico é maior. Este problema será no futuro ultrapassado com o aumento da velocidade dos computadores e com a sofisticação dos algoritmos utilizados no cálculo dos modos de propagação.

Na próxima edição da Tecnovisão vamos apresentar um sistema de comunicação digital acústico submarino com detecção baseada em *matched field processing*, ref. [7] e [8]. Iremos nesse artigo estudar a sensibilidade da detecção no receptor à imprecisão com que são conhecidas algumas características do meio ambiente submarino.

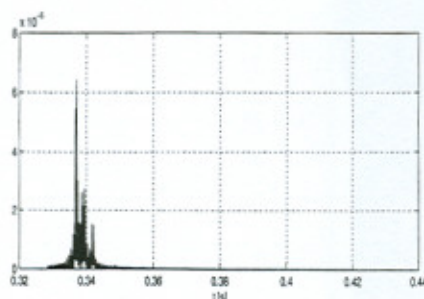


Figura 5- Resposta impulsiva de um canal acústico submarino em águas pouco profundas, com sedimento mole (Lodo).

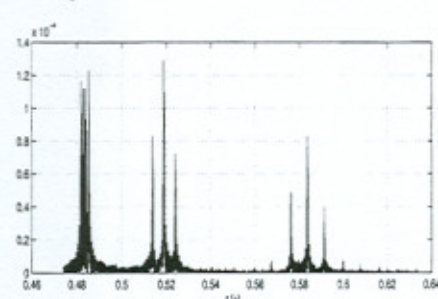


Figura 6- Resposta impulsiva de um canal acústico submarino em águas pouco profundas, com sedimento duro (Moraina)

5. Bibliografia:

[1] F. Jensen and M. Ferla, "The saclantcen normal-mode acoustic propagation model", Saclant ASW Research Centre, 1979.

[2] F. Jensen, W. Kuperman, M. Porter and H. Schmidt, "Computational Ocean Acoustics", American Institute of Physics, 1993.

[3] I. Tolstoy and C. Clay, "Oceans Acoustics", American Institute of Physics, 1966, 1987.

[4] C. Clay and H. Medwin, "Acoustical Oceanography", John Wiley & Sons, 1977.

[5] M. Porter, "The KRAKEN normal mode program", Saclant Undersea Research Centre, 1991.

[6] C. Ferla, M. Porter and J. Jensen, "Coupled SACLANTCEN normal mode propagation loss model", Saclant Undersea Research Centre, 1993.

[7] A. Silva, S. Jesus, "Using Normal Mode Channel Structure for Narrow Band Underwater Communications in Shallow Water", OCEAN'S 98, Nice, França, 1998.

[8] A. Silva, orientador S. Jesus, "Utilização de Modelos de Propagação nas Comunicações Acústicas Submarinas", Dissertação de Mestrado, Universidade do Algarve, UCEH, 1998.



1979
1999

Faro
Cidade Universitária



20^º aniversário

