UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ENGENHARIA MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

ADRIANA FÉLIX DE ANDRADE OLIVEIRA

# SISTEMAS MIMO UTILIZANDO OFDM EM COMUNICAÇÕES SUBMARINAS

NITERÓI, NOVEMBRO de 2013

## ADRIANA FÉLIX DE ANDRADE OLIVEIRA

## SISTEMAS MIMO UTILIZANDO OFDM EM COMUNICAÇÕES SUBMARINAS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado "Stricto Sensu" em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de concentração: Sistemas Móveis de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. EDUARDO RODRIGUES VALE

## SISTEMAS MIMO UTILIZANDO OFDM EM COMUNICAÇÕES SUBMARINAS

## ADRIANA FÉLIX DE ANDRADE OLIVEIRA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado "Stricto Sensu" em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de concentração: Sistemas Móveis de Telecomunicações.

Aprovada em Novembro de 2013

Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Vale Universidade Federal Fluminense (Orientador)

Prof. Dr. José Santo Panaro Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Julio César Rodrigues Dal Bello Universidade Federal Fluminense

> Prof. Dr. Eduardo Esteves Vale Marinha do Brasil

Niterói, NOVEMBRO de 2013

### Agradecimentos

Dedico as próximas linhas ao agradecimento às pessoas e às entidades que possibilitaram a realização e o progresso desta dissertação.

Ao professor Dr. Eduardo Vale pelos esclarecidas orientações, pelas críticas e pelas importantes sugestões para melhoria do conteúdo da dissertação.

Aos demais professores do Mestrado pelo alto nível das aulas ministradas, que me permitiram adquirir tal nível de conhecimento.

Agradeço à UFF pelo apoio acadêmico e por toda a estrutura disponibilizada para o avanço dos meus estudos e a realização deste trabalho.

Agradeço a meus pais, Adelson e Marileize, pela criação e formação que me proporcionaram. Certamente as minhas conquistas são consequência da base sólida que eles me ajudaram a construir.

Agradeço às minhas irmãs, Ana Paula e Ana Luíza, pelo apoio e incentivo aos meus projetos e desafios e pela presença em todos os momentos da minha vida.

Agradeço também aos colegas que conheci na UFF, com quem pude partilhar as conquistas mas também os momentos de dificuldades.

Agradeço a Deus pela sabedoria com que me capacitou durante todo este trabalho.

#### RESUMO

Esta dissertação apresenta um mecanismo de comunicação acústica submarina que até o presente momento ainda não foi muito explorado. O objetivo deste estudo é contribuir para o aprimoramento das pesquisas acadêmicas neste assunto e tentar implementar sistemas de comunicação que possam suprir necessidades do mercado. No início do trabalho, é feita uma introdução sobre as comunicações submarinas, os equipamentos e as técnicas mais utilizadas. No próximo momento, é apresentada e detalhada a técnica de transmissão de Alamouti. Por fim, são feitas simulações em Matlab com a intenção de obter resultados para aplicação de tecnologias como MIMO e OFDM no ambiente submarino e analisar os ganhos do sistema com a aplicação destas tecnologias.

Palavras-chave: comunicação acústica, MIMO, OFDM, Alamouti, hidrofone, projetor, arrays

#### ABSTRACT

This work presents an underwater acoustic communication mechanism which has not been much explored yet. The main goal of this dissertation is to begin academic studies in this subject and try to implement communication systems that can be used to attend market needs. In the beginning of the dissertetion an introduction about underwater communication is done, as well as the presentation of the equipment used and the most common techniques applied. After, the Alamouti's transmission technique is presented and detailed. Finally, Matlab simulations are developed in order to obtain results for the use of MIMO and OFDM in underwater scenario and analyze the gains achieved by the system.

Keywords: acoustic communication, MIMO, OFDM, Alamouti, hydrophone, projector, arrays

# Sumário

1. INTE	ROD	UÇÃO	.13
1.1.	MO	TIVAÇÃO	. 14
1.2.	OB.	JETIVOS	. 14
1.3.	EST	IRUTURA DA DISSERTAÇÃO	. 15
2. CON	MUN	ICAÇÃO ACÚSTICA SUBMARINA	. 16
2.1.	HIS	TÓRIA	.16
2.2.	COI	NCEITOS DA HIDROACÚSTICA	. 17
2.3.	PAF	RÂMETROS PARA COMUNICAÇÃO	.20
2.3.7	1.	Velocidade	.21
2.3.2	2.	Refração e Reflexão	.23
2.3.3	3.	Propagação	.24
2.3.4	4.	Ruídos	. 27
2.3.	5.	Caracterização do Canal	. 28
2.4.	APL	LICAÇÃO DAS COMUNICAÇÕES SUBMARINAS	.29
2.4.1	1.	Comunicação	.29
2.4.2	2.	SONAR	.29
2.4.3	3.	Estudos Sísmicos e Climáticos	.31
3. TÉC	CNIC	AS DE TRANSMISSÃO: OFDM E MIMO	.33
3.1.	OF	DM	.34
3.2.	MIN	10	.36
4. OE	SQU	IEMA DE TRANSMISSÃO ALAMOUTI	.40
4.1.	TRA	ANSMISSÃO OFDM COM O ESQUEMA DE ALAMOUTI	.44
5. SIM	IULA	ÇÕES DE TRANSMISSÃO SUBMARINA COM ESQUEMA DE ALAMOUTI	.47

ļ	5.1.	MODELO DE TRANSMISSÃO SUBMARINA COM OFDM	47
ļ	5.2. ALAM	MODELO DE TRANSMISSÃO SUBMARINA COM OFDM E O ESQUEMA DE OUTI	55
6.	COI	NCLUSÃO	66
(	6.1.	TRABALHOS FUTUROS	67
7.	REF	ERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
8.	SITI	ES CONSULTADOS	71

ANEXO	D – Modelo de Canal Acústico	Erro! Indicador não definido.
ANEXO	C – Temperatura dos Oceanos	78
ANEXO	B - Ruídos Submarinos	74
ANEXO	A – Histórico das Comunicações Submarinas	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

5
Fig. 2.2: Representação aproximada da velocidade acústica no mar
Fig. 2.3: Simulação de propagação acústica em ambiente submarino para onda de 250Hz com incidência de 5º e largura do feixe de 1,5º. A velocidade é constante a 1500 m/s e a profundidade atingida é de 1000 m. Na simulação foi levada em conta a atenuação devido às ondas de superfície na primeira reflexão, causadas por ventos de 20 m/s
Fig. 2.4: Fontes de ruído acústico submarino28
Fig. 2.5: Esquemas de funcionamento do SONAR
Fig. 3.1: Espaçamento entre as portadoras no OFDM35
Fig. 3.2: Multipercurso acústico submarino37
Fig. 3.3: Esquema básico de antenas transmissoras e receptoras no modelo MIMO38
Fig. 4.1: Estrutura de um esquema STBC40
Fig. 4.2: Diagrama de codificação42
Fig. 4.3: Esquema de diversidade de transmissão proposto por Alamouti43
Fig. 4.4: Taxa de erro para sistema Alamouti com modulação OFDM com 512 portadoras (K=512). O EMQ do sistema foi de 3,2dB45
<ul> <li>Fig. 4.4: Taxa de erro para sistema Alamouti com modulação OFDM com 512 portadoras (K=512). O EMQ do sistema foi de 3,2dB</li></ul>
<ul> <li>Fig. 4.4: Taxa de erro para sistema Alamouti com modulação OFDM com 512 portadoras (K=512). O EMQ do sistema foi de 3,2dB</li></ul>

Fig. 5.3: Amostra 2 do sinal, após transmissão de 20.400 símbolos pelo sistema 1: a) Espectro do sinal; b) Resposta em frequência do canal; c) Distribuição dos símbolos Fig. 5.4: Amostra 3 do sinal, após transmissão de 31.200 símbolos pelo sistema 1: a) Espectro sinal; b) Resposta em frequência do canal; c) Distribuição dos símbolos do Fig. 5.5: Taxa de erro do sistema 1: a)Amostra 1; b) Amostra 2; Amostra 3. Diagrama de codificação......52 5.6: Comportamento do sistema 1 durante período de desvanecimento Fig. seletivo......54 Fig. 5.7: Esquema de transmissão de Alamouti......55 5.8: Esquema de transmissão 2, com modulação OFDM e codificação de Fia. Fig. 5.9: Amostra 1 do sinal, após transmissão de 7.200 símbolos pelo sistema 2: a) Espectro do sinal; b) Resposta em frequência do canal; c) Distribuição dos símbolos Fig. 5.10: Amostra 2 do sinal, após transmissão de 20.400 símbolos pelo sistema 2: a) Espectro do sinal; b) Resposta em frequência do canal; c) Distribuição dos símbolos Fig. 5.11: Amostra 3 do sinal, após transmissão de 31.800 símbolos pelo sistema 2: a) Espectro do sinal; b) Resposta em frequência do canal; c) Distribuição dos símbolos Fig. 5.12: Níveis reais dos símbolos transmitidos......61 Fig. 5.13: Taxa de erro do sistema 2: a) Amostra 1; b) Amostra 2; Amostra 3......62 Fig. 5.15: Comparação entre as taxas de erro dos sistemas para diferentes valores de RSR.. 65

Fig. C.1: Exemplos de diagramas de temperatura-salinidade - Diagramas-TS......83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - C	odificação espaço-l	emporal do esque	ma de Alamouti	42
----------------	---------------------	------------------	----------------	----

## LISTA DE ACRÔNIMOS

- 3GPP 3rd Generation Partnership Project
- CDMA Code Division Multiple Access
- EMQ Erro Médio Quadrático
- FDM Frequency Division Multiplexing
- ICI Inter-Carrier Interference
- ISI Inter-Symbol Interference
- LASER Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- MIMO Multiple-Input Multiple-Output
- MSE Mean Squared Error
- OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- OSTBC Orthogonal Space Time Block Code
- MRRC Maximal Ratio Receiver Combining
- **QPSK Quadrature Phase-Shift Keying**
- QAM Quadrature Amplitude Modulation
- RMS Root Mean Square
- RSR Relação Sinal Ruído
- SIMO Simple-Imput Multiple-Output
- SM Spatial Multiplexing
- SOSU Sound Surveillance System
- SOFAR Sound Fixing And Ranging
- SONAR Sound Navigation And Ranging
- SPL Sound Pressure Level
- STBC Space Time Block Code
- STTD Space Time Transmission Diversity
- **TDMA Time Division Multiple Access**
- UMTS Universal Mobile Telecommunications System

## 1. INTRODUÇÃO

No decorrer das últimas décadas, as comunicações sem fio vem sendo desenvolvidas e os avanços acontecem em grande escala, a fim de suprir as demandas cada vez mais crescentes. Da mesma maneira, as comunicações sem fio submarinas têm obtido avanços significativos e há um grande esforço de estudos neste tema, visando o desenvolvimento deste ramo.

Apesar de as comunicações sem fio em ambientes submersos serem uma necessidade, são ao mesmo tempo um grande desafio, pois o comportamento complexo inerente aos ambientes submarinos impõe grande dificuldade na caracterização do meio e no desenvolvimento de sistemas eficientes.

Para alguns setores este tipo de comunicação possui grande importância. Um exemplo disso é a necessidade de comunicação entre equipamentos remotos de pesquisas, que torna-se difícil pois as ondas de rádio apresentam reduzida aplicabilidade nos ambientes submarinos devido à forte atenuação que sofrem.

A acústica submarina é utilizada também como ferramenta para auxiliar o estudo da vida marinha, devido a sua excelente propriedade de propagação. A bioacústica investiga a produção sonora, sua dispersão através do meio e sua recepção pelos animais. Também é estudado o efeito de plantas e animais no som propagado embaixo d'água.

Devido às diversas aplicabilidades da tecnologia começou-se a investir no desenvolvimento da comunicação acústica submarina. As ondas sonoras, ao contrário das ondas de rádio, conseguem se propagar por longas distâncias no ambiente submarino, sendo assim uma opção adequada para transportar informação.

Além disso, o desenvolvimento constante de técnicas de modulação e de transmissão ampliou ainda mais as possibilidades de estudos nesta área.

13

### 1.1. MOTIVAÇÃO

O estudo da comunicação acústica ainda é um tema pouco explorado no ramo das telecomunicações. Seu aprimoramento em ambientes submarinos representa uma necessidade humana e um desafio à engenharia, já que os meios submarinos possuem um comportamento complexo com relação à propagação de sinais acústicos. O interesse em sua utilização é vasto, principalmente no ramo militar, para comunicação entre navios e submarinos.

Como os sistemas acústicos possuem uma largura de banda limitada, requer-se que um sistema de comunicação acústico submarino seja simultaneamente eficiente na gestão dos recursos e eficaz nos mecanismos que implementa para ultrapassar as limitações do meio.

Com base nesta escassez de material e de desenvolvimento tecnológico na área, foi surgindo o interesse em pesquisar mais a fundo o assunto, as tecnologias existentes e disponíveis no mercado e também as tecnologias que podem ser desenvolvidas e melhor utilizadas, com base nas técnicas de comunicação sem fio que vem se aprimorando a cada dia.

#### **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é apresentar as técnicas de comunicação acústica existentes, abordá-las e dar inicio a pesquisas de novas técnicas de comunicação, combinando a tecnologia existente às novas técnicas de transmissão e de modulação que estão ganhando cada vez mais evidencia, como o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e a tecnologia MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*).

### 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta uma introdução à comunicação acústica submarina. É feito um breve descritivo dos equipamentos e aparelhos utilizados nestas transmissões, bem como uma análise da história e evolução desta tecnologia. Nele também serão expostos os principais parâmetros para a comunicação submarina.

O Capítulo 3 aborda a técnica de modulação OFDM e a tecnologia de transmissão MIMO. Estas tecnologias serão aplicadas na comunicação acústica submarina a fim de testar o desempenho e coletar resultados.

O Capítulo 4 apresenta a técnica de diversidade de transmissão de Alamouti, um caso particular de transmissão MIMO que será utilizado nos testes.

O Capítulo 5 abordará os testes desenvolvidos em Matlab, apresentando os sistemas utilizados e analisando os resultados obtidos.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho. Nele são destacadas os principais resultados obtidos e indicadas as áreas e atividades para desenvolvimento de trabalhos futuros.

## 2. COMUNICAÇÃO ACÚSTICA SUBMARINA

Nesta seção do documento, será feita uma breve análise da evolução histórica das comunicações por sinais acústicos em ambientes submarinos, a fim de contextualizar o desenvolvimento tecnológico obtido até à atualidade. Será apresentado também uma breve análise dos parâmetros a serem considerados na comunicação submarina.

#### 2.1.HISTÓRIA

A comunicação acústica submarina tem sido utilizada por animais marinhos há milhões de anos. No entanto, o estudo deste meio de comunicação teve início apenas em 1490 quando Leonardo Da Vinci sugeriu um mecanismo de detecção de navios longínquos através de sinais sonoros: "Se você parar o seu navio, colocar a boca de um grande tubo na água e a outra extremidade deste tubo em sua orelha, você será capaz de ouvir navios a uma grande distância." [2].

Em 1687 Isaac Newton escreveu seu Princípio Matemático da Filosofia Natural, que incluía o primeiro tratamento matemático para o som. O próximo grande passo no desenvolvimento das comunicações acústicas submarinas foi dado por Daniel Colladon e Charles Sturm, que em 1826 mediram o intervalo de tempo entre um flash de luz e o som do sino de um navio submerso. Com este experimento eles obtiveram os primeiros resultados quantitativos para a velocidade do som na água: 1435 m/s por uma distância de 17Km.

O naufrágio do Titanic em 1912 e a Primeira Guerra Mundial trouxeram o ímpeto para uma nova onda de progressos nestes estudos.

Em 1919 foi publicado o primeiro artigo científico relacionado ao tema, descrevendo a refração das ondas sonoras produzida pela temperatura e pelo gradiente de salinidade no oceano. Nas décadas seguintes foram desenvolvidas diversas aplicações para as comunicações acústicas submarinas.

Após a segunda Guerra Mundial, o desenvolvimento dos sistemas SONAR aconteceu em larga escala devido à Guerra Fria. Isto resultou em avanços teóricos e práticos na transmissão acústica submarina. A Marinha Americana, por exemplo, começou a utilizar o SOSU (*Sound Surveillance System*) a partir de 1950, para rastrear o movimento de submarinos soviéticos. Neste sistema os hidrofones ficavam no fundo do mar e eram conectados por cabos submarinos.

Atualmente, há grande interesse em aprimorar as comunições submarinas, criando sistemas que permitam a transmissão da dados em grande escala e em altas taxas. Este trabalho traz um estudo de uma técnica que pode atender a esta demanda, que é a técnica de Alamouti aplicada às comunicações submarinas.

#### 2.2. CONCEITOS DA HIDROACÚSTICA

Comparada com a comunicação em radiofrequência realizada no espaço livre, a comunicação debaixo d'água é severamente limitada devido ao fato de a água ser essencialmente opaca à radiação eletromagnética, causando forte atenuação ao sinal. Mesmo na faixa visível, onde as condições de propagação são um pouco menos severas, a luz penetra apenas algumas centenas de metros e, assim mesmo, somente nas águas mais claras.

Essa dificuldade de transmissão das ondas eletromagnéticas em radiofrequência levou ao desenvolvimento das técnicas acústicas para envio de mensagens em meios submarinos, através da transmissão de ondas acústicas. Hidroacústica, também conhecida como acústica submarina, é o estudo da propagação das ondas mecânicas que constituem o som através da interação com a água e suas fronteiras.

Os sistemas acústicos, embora permitam comunicações de longa distância, transmitem dados com baixas taxas e com retardos, devido à velocidade relativamente lenta do som na água. A comunicação submarina torna-se ainda mais difícil devido aos fatores como propagação multipercurso, variação de tempo de resposta do canal e pequena banda disponível.

Existem diversas maneiras de se empregar a comunicação acústica em ambiente submarino, dentre elas, o mais comum é através da utilização de hidrofones. O hidrofone é um aparelho transdutor que funciona como um microfone, porém é designado para uso embaixo d'água. Este aparelho serve para captar ou gravar sons que são emitidos na água. Os hidrofones até podem funcionar no ar, porém terão menor sensibilidade pois possuem impedância acústica favorável ao funcionamento na água. Na figura 2.1 são apresentados alguns dos diversos modelos existentes de hidrofones.



Fig. 2.1: Modelos de hidrofones

A propagação de ondas sonoras submarinas consiste na alternância entre compressão e rarefação da água. Estas alternâncias são detectadas por um hidrofone como variações de pressão. A maioria dos hidrofones funciona gerando eletricidade quando submetidos a uma variação de pressão, baseados na transdução piezoelétrica. Sendo assim, eles conseguem converter um sinal sonoro em um sinal elétrico.

No receptor, os hidrofones medem a flutuação de pressão, que é geralmente convertida em nível de pressão sonora (SPL - *Sound Pressure Level*). O SPL acústico é uma medida que determina o grau de potência de uma onda sonora, geralmente medido em decibéis. Sua correspondência com o SPL do ar não é imediata, devido às diferenças de pressão nos dois meios.

Um único e pequeno transdutor cilíndrico de cerâmica é capaz de atingir uma recepção omnidirecional quase perfeita. No entanto, os hidrofones podem ser direcionais, conseguindo aumentar a sensibilidade em determinada direção.

Há duas técnicas para a elaboração de hidrofones direcionais. A primeira delas é baseada no uso de transdutores focais. Neste caso, é utilizado um transdutor omnidirecional com um refletor acústico de formato cônico acoplado a ele, para focar o sinal. A outra técnica para se obter diretividade é usar um corpo esférico em volta do hidrofone. A vantagem deste segundo tipo é que permite que o hidrofone seja movido na água, ao contrário do modelo anterior que deve ser usado sem deslocamento, já que o refletor impede seu movimento na água.

Uma configuração possível é a disposição de múltiplos hidrofones em um *array*, podendo-se reforçar o sinal de uma determinada direção e enfraquecer o sinal de outras direções. Na maioria das vezes os *arrays* de hidrofones são lineares, mas também é possível construir *arrays* bidimensionais ou até mesmo tridimensionais.

## 2.3. PARÂMETROS PARA COMUNICAÇÃO

Considerando-se a necessidade de realizar comunicações digitais num meio submarino através da propagação de sinais sonoros, torna-se importante compreender as principais propriedades e particularidades da hidroacústica.

A onda acústica possui uma natureza mecânica e distribui a sua energia no espaço através da vibração e deslocamento das partículas que constituem o meio. As moléculas nos líquidos estão mais próximas umas das outras do que no ar e por isso a velocidade do som na água é 4,4 vezes maior que no ar.

As sucessivas compressões e rarefações<sup>1</sup> do meio no sentido de deslocamento da onda originam alterações de pressão que descrevem a onda [3]. Na presença de um meio líquido, a propagação assume um caráter longitudinal pois a vibração molecular ocorre na direção de propagação da onda.

Em um meio submarino, tais alterações de pressão dependem de inúmeros parâmetros, entre estes, grandezas meteorológicas (como a temperatura e o vento), a salinidade e a acidez do líquido e outras perturbações existentes no meio, como a presença de vida marinha e a atividade humana com embarcações. Considerando a complexidade de análise de todos estes fenômenos, o estudo do canal acústico submarino é tipicamente abordado segundo os mecanismos de atenuação, variabilidade da velocidade de propagação do sinal acústico, variabilidade temporal, espectral e espacial do próprio meio submerso. Devido à grande variação dos três últimos parâmetros, a caracterização estatística do comportamento destes canais é também muito difícil e demanda muito estudo e observação.

As frequências típicas associadas com a acústica submarina estão entre 10 Hz e 1 MHz. A propagação do som no oceano para frequências menores que 10 Hz é praticamente impossível enquanto que acima de 1 MHz elas são raramente usadas porque são absorvidas muito rapidamente.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Fenômeno que corresponde à diminuição da densidade de um corpo com aumento de volume.

Apesar destas características adversas e das dificuldades de propagação, este modo de comunicação é hoje predominante nos estudos, pesquisas e aplicações submarinas. Também é importante considerar que os alcances de comunicação são consideráveis, podendo atingir dezenas de quilômetros [2].

#### 2.3.1. Velocidade

É sabido que a velocidade do som (c) está relacionada à frequência (f) e ao comprimento de onda ( $\lambda$ ) da seguinte forma:

$$c = f \cdot \lambda \tag{1}$$

Na frequência de 1 kHz o comprimento de onda na água é aproximadamente 1,5m. Os valores aproximados da velocidade do som na água pura e na água do mar, sob pressão atmosférica, são respectivamente 1.450 m/s e 1.500 m/s. Quando a temperatura da água pura é de 8°C a velocidade do som é de 1.438 m/s.

A velocidade de propagação dos sinais acústicos em meios líquidos é considerada baixa, mas ela cresce com o aumento da pressão, da temperatura e da salinidade.

Por sua vez, a velocidade de partícula (u), que se refere ao movimento de moléculas no meio devido ao som, relaciona a pressão da onda plana (p) à densidade do fluido (ρ) e à velocidade do som (c) da seguinte forma:

$$p = c \cdot u \cdot \rho \tag{2}$$

O produto c.p é conhecido como impedância acústica característica.

Para cada um dos fatores que influenciam na variação da velocidade acústica pode ser calculado um gradiente.

Temperatura: +3 m/s por grau (°C) de aumento, à pressão e salinidade constantes.

Salinidade: +1,2 m/s por cada 0,001 l de aumento, à temperatura e pressão constantes.

Pressão: +0,016 m/s por cada metro de aumento de profundidade, à temperatura e salinidade constantes.

A figura 2.2 traz uma representação gráfica dos valores da velocidade do som no mar para diferentes níveis de profundidade. Através do gráfico, nota-se que o oceano está dividido em zonas verticais que se definem em razão do gradiente de cada uma delas.



Fig. 2.2: Representação aproximada da velocidade acústica no mar

Fonte: http://www.mnve.mil.ve/web/index.php?option=com\_content&task=view&id=63&Itemid=84

Zona 1 – Camada Superficial ou de Mescla: vai desde a superfície até cerca de 50 metros de profundidade, podendo se estender um pouco mais durante o inverno. Esta zona é mais aquecida devido à incidência solar e possui propriedades hidrográficas uniformes.

Zona 2 – Termoclina Estacional: zona de rápida transição, onde (na maior parte das situações) a temperatura decresce rapidamente com a profundidade, apresentando um gradiente negativo cuja intensidade varia de acordo com a época do ano. No verão e no outono a intensidade do gradiente pode ser muito acentuada enquanto que no inverno esta zona pode confundir-se com a camada superficial.

Zona 3 – Termoclina Permanente ou Oceânica: esta zona vai desde o final da zona 2 até os 1.000 metros de profundidade aproximadamente. É a zona de transição entre as águas mais quentes da camada superficial até as águas frias das grandes profundidades oceânicas. A temperatura no limite superior da termoclina permanente pode ser acima dos 20°C nos trópicos até bem pouco acima dos 15°C em regiões temperadas. No limite inferior as temperaturas são uniformes em torno de 4 - 6°C. Esta zona apresenta um gradiente negativo suave e uniforme.

Zona 4 – Isoterma profunda: vai desde o final da zona 3 até o fundo. Nesta zona a temperatura permanece constante e a velocidade acústica aumenta com a profundidade.

#### 2.3.2. Refração e Reflexão

Assim como as ondas eletromagnéticas, as ondas acústicas estão sujeitas a efeitos de dispersão, absorção, reflexão, refração. Tanto a superfície da água quanto o fundo podem causar espalhamento e reflexão nas ondas sonoras. Pode ocorrer ainda o fenômeno de reverberação, quando uma parcela da energia sonora espalhada retorna à fonte.

A fronteira entre a superfície do mar e o ar pode ser considerado uma superfície perfeitamente refletora para frequências abaixo de 1 kHz. O contraste de impedâncias é tal que somente uma pequena quantidade de energia pode se dissipar. As ondas acústicas que são refletidas por esta superfície sofrem uma mudança de fase de 180°. Em altas frequências (acima de 1kHz) ou quando o mar está agitado, uma parte da onda incidente na superfície sofre espalhamento.

Já a diferença entre a impedância acústica da água e do fundo do mar é muito complexa, pois depende do material que forma este fundo e também da profundidade das camadas. Dependendo das características e do ângulo de incidência da frente de onda, além da absorção de uma considerável parcela de energia, poderá ocorrer, um deslocamento de fase no fundo.

Um fundo de pedra, coral ou conchas é uma fonte potencial de reverberação ao passo que a areia funciona como um bom refletor, permitindo que a maior parte da energia siga a sua trajetória. Um fundo de lama não causará reverberação significativa, porém atuará como absorvente de energia sonora.

#### 2.3.3. Propagação

A propagação das ondas acústicas no fundo do mar depende de diversos fatores. A direção de propagação do som é determinada pelo gradiente de velocidade do som na água. No mar, o gradiente de velocidade do som é muito maior na vertical do que na horizontal. A velocidade do som tende a aumentar com o aumento da profundidade, devido à maior pressão.

Em geral, há uma redução na intensidade do som à medida que ele se propaga na água. Em alguns casos, no entanto, pode ser obtido um ganho. Sendo  $I_s$  a intensidade de campo distante da fonte em um ponto a 1m de distância de seu centro e  $I_r$  a intensidade no receptor, então a perda por propagação da onda acústica pode ser definida por:

$$PL = 10log(I_s/I_r) \tag{3}$$

 $\langle \alpha \rangle$ 

Na equação, I<sub>r</sub> significa um valor escalar equivalente à intensidade da onda plana do campo sonoro.

É possível escrever a equação de perda também em função da pressão, ao invés da intensidade:

$$PL = 20log(p_s/p_r) \tag{4}$$

Neste caso,  $p_s$  é a pressão acústica de campo distante de um projetor em um ponto a 1m de distância de seu centro e  $p_r$  é a pressão no receptor.

Para uma propagação de curto alcance, a perda ocorre principalmente por espalhamento enquanto que para longo alcance a perda ocorre principalmente pela absorção ou pela dispersão. Para baixas frequências, a absorção da onda sonora é pequena. Para altas frequências, acima de 100 kHz, a principal causa de absorção da onda é a viscosidade do meio.

A atenuação da onda depende muito de sua velocidade, que por sua vez é afetada pela profundidade e por gradientes de temperatura, pressão e salinidade. Em águas rasas, a atenuação por reflexão ou absorção no fundo do mar é geralmente o principal fator de atenuação para transmissões de longa distância.

Nas regiões equatoriais e latitudes de clima temperado a temperatura na superfície do oceano é quente o suficiente para reverter os efeitos da pressão, de forma que a velocidade mínima de propagação ocorre há poucas centenas de metros. A presença deste mínimo cria um canal conhecido como *Deep Sound Channel*, também chamado de SOFAR (*Sound Fixing And Ranging*). Neste canal, o som é

guiado por milhares de quilômetros sem que haja contato com a superfície e nem com o fundo do mar, reduzindo os efeitos de atenuação.

A propagação da onda acústica no ambiente submarino é descrita pela equação da onda com as condições de contorno apropriadas. Alguns modelos de propagação já foram desenvolvidos e cada um é, geralmente, computacionalmente eficiente para uma determinada gama de frequências.



Fig. 2.3: Simulação de propagação acústica em ambiente submarino para onda de 250Hz com incidência de 5º e largura do feixe de 1,5º. A velocidade é constante a 1.500 m/s e a profundidade atingida é de 1.000 m. Na simulação foi levada em conta a atenuação devido às ondas de superfície na primeira reflexão, causadas por ventos de 20 m/s.

Fonte: R.A. Zingarelli and D.B. King: RAM to Navy Standard Parabolic Equation: Transition from Research to Fleet Acoustic Model, Figure 11. In: 2003 NRL Review.

#### 2.3.4. Ruídos

Para que seja possível receber a informação transmitida por uma onda acústica é preciso que sua amplitude esteja acima de um dado nível. Este nível é determinado pelo sistema de processamento de sinal utilizado e também pelo nível de ruído existente no ambiente. Os ruídos existentes no oceano provêm de diversas naturezas e variam de acordo com o ambiente e com a frequência da onda. Os níveis típicos do espectro de ruído diminuem com o aumento da frequência.

Para as frequências mais baixas, de 0,1 Hz até 10 Hz, as principais fontes de ruído são os movimentos das águas e os micro abalos sísmicos da terra, que apesar de pouco intensos, são constantes. Nesta faixa, os níveis médios de ruído são de aproximadamente 140 dB re 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>/Hz<sup>2</sup>.

Para frequências em torno de 100Hz o ruído dominante é causado pelo tráfego distante de navios. O nível médio do ruído nesta frequência é de 30 dB re 1 µPa²/Hz.

Na faixa entre 1 kHz e 30 kHz, a principal fonte de ruído é o barulho causado pelos ventos na superfície. Acima de 100 kHz a principal perturbação são os ruídos térmicos causados pelas moléculas de água, devido à agitação térmica de seus elétrons. Neste caso, os níveis de ruído são de 25 dB re 1 µPa²/Hz em média.

Outros ruídos como atividades sísmicas, vulcões, chuvas e atividades biológicas da vida marinha também podem contribuir com a adição de ruídos ao meio. A figura 2.4 ilustra algumas das diferentes causas de ruídos que podem afetar a comunicação acústica submarina.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> O nível de potência expresso em dB re 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>/Hz representa o nível médio de pressão sonora por cada banda de 1Hz.



Fig. 2.4: Fontes de ruído acústico submarino

Fonte: http://www.mra.pt/industria/produtos/oceanografia/hidrofones-e-transdutores/

### 2.3.5. Caracterização do Canal

A comunicação no meio aquático é bastente restrita. De acordo com Stojanovic em [19], o canal acústico aquático pode ser caracterizado pelos seguintes pontos:

 Pequena largura de banda: no máximo centenas de kHz. A largura de banda depende da frequência e do alcance. A maior parte dos sistemas acústicos opera abaixo de 30 kHz;

- Desvanecimento multipercurso: como mostrado em [20] e [21] o modelo de desvanecimento Rayleigh é usado para modelar desvanecimento em pequena escala.

- Alta atenuação;

- Alta latência: a velocidade do som na água é aproximadamente 1500m/s, ou seja, cinco ordens de grandeza de diferença para a velocidade da luz no vácuo.

## 2.4. APLICAÇÃO DAS COMUNICAÇÕES SUBMARINAS

#### 2.4.1. Comunicação

A comunicação submarina possibilita diversas aplicações, tais como coleta de dados para monitoramento ambiental (monitoramento de poluição química, biológica ou nuclear), comunicação entre robôs, controle e localização de robôs e veículos submarinos utilizados na exploração submarina, comunicação de navios e submarinos com bases terrestres ou aquáticas, contato entre mergulhadores, etc.

Uma outra aplicação possível é o uso de telemetria acústica para acionar remotamente um interruptor ou acionar um evento. Outro exemplo da aplicação de controle remoto em atividades submarinas são as versões acústicas de aparelhos usados para retornar do fundo do mar os instrumentos utilizados no final de uma implantação.

O rastreamento submarino também é uma demanda comum de comunicação. Através de cálculos de triangulação, a posição de um alvo ou de uma base pode ser rapidamente descoberta com precisão de centímetros.

#### 2.4.2. SONAR

SONAR (SOund Navigation And Ranging) é o nome dado ao sistema acústico equivalente ao radar. Neste sistema, composto por um transmissor de ondas mecânicas ultrassonoras e um receptor, pulsos sonoros são emitidos para sondar o mar. Quando estes pulsos encontram um obstáculo, refletem-se nele e voltam ao ponto de partida. Os ecos ou reflexões desses pulsos são captados e processados para extrair informações sobre o meio submarino, as fronteiras e os objetos submersos. As frequências acústicas utilizadas variam desde muito baixas (infra-sônicas) até extremamente altas (ultra-sônicas).

Quando o transmissor e o receptor do sistema estão no mesmo lugar a operação é chamada monoestática. Quando estão separados, a operação é biestática. Quando mais de um transmissor ou receptor são utilizados, espacialmente separados, a operação é chamada multiestática. A maioria dos sonares opera de modo multiestático, com a mesma matriz sendo muitas vezes usada para transmissão e recepção.

O Sonar passivo é um uso alternativo desse sistema. Nele as informações são obtidas apenas captando os sons refletidos pelos objetos submarinos.

Inicialmente o sistema era utilizado para a localização de submarinos, em época de guerra, mas depois passou a ter muita utilização na navegação, no estudo e pesquisa dos oceanos, na pesca, e nos estudos atmosféricos.



Fig. 2.5: Esquemas de funcionamento do SONAR

*Fonte:* Marine Science Today, a publication of OceanLines LLC; *The American Heritage*® *Science Dictionary Copyright* © 2010 by Houghton Mifflin Harcourt Publishing Company.

#### 2.4.3. Estudos Sísmicos e Climáticos

Sísmica de reflexão é um método de prospecção geofísica, semelhante ao ultrassom, que estima as propriedades da subsuperfície da Terra com base na reflexão de ondas sísmicas. O método baseia-se em uma técnica acústica onde ondas de som são geradas a partir de uma fonte sísmica (fontes de energia controlada como armas de ar, vibroseis<sup>3</sup> e explosivos) transportada por um navio. Estas ondas, ao atingirem o fundo do mar, são refletidas, e os ecos são captados por uma grande quantidade de sensores (hidrofones), que são puxados por cabos ligados ao mesmo navio que transporta a fonte, posicionados um pouco mais atrás e sustentados por bóias.

A energia captada pelos hidrofones é convertida em sinais digitais que serão interpretados posteriormente por especialistas, e servirão para desenhar um mapa do relevo do fundo do mar.

Usualmente utilizam-se fontes de som de baixa frequência (abaixo de 100 Hz) para sondar o leito do mar. Apesar da relativa baixa resolução, devido ao comprimento de onda longo, esses sons são preferíveis porque as altas frequências são fortemente atenuadas.

Sensores instalados no leito oceânico podem medir variações sísmicas com o objetivo de se analisar os terremotos submarinos e detectar a formação de tsunamis. Os estudos sísmicos também podem auxiliar na detecção de reservas de petróleo e na sua exploração. Além disso, operações de extração de petróleo exigem uma série de informações, tais como velocidade e direção das correntes marinhas, que podem ser obtidos através de sistemas de sensores.

Também pode-se utilizar sensores acústicos para monitorar efeitos climáticos, através do som produzido pelo vento e pela chuva. Em [4] Nystuen descreve um pluviômetro acústico. Um raio também pode ser detectado através de técnicas acústicas.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Processo sísmico de reflexão utilizando um dispositivo mecânico sobre caminhões para produzir ondas sonoras.

A termometria acústica de oceano utiliza sons de baixa frequência para realizar as medições de temperatura global dos oceanos. Existe também uma vasta aplicação de sistemas acústicos para realizar estudos e monitorar dados oceanográficos como salinidade, condutividade, correntes marítimas, pressão, ondas e marés.

## 3. TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO: OFDM E MIMO

Nos últimos anos, foram testadas técnicas de modulação multi-portadora no âmbito das comunicações submarinas a fim de se obter melhores resultados para as transmissões digitais neste meio [2]. Destas técnicas destaca-se a modulação OFDM, que permite mecanismos de implementação consideravelmente eficientes uma vez que permite uma ocupação eficiente da banda disponível utilizando um conjunto de portadoras que podem sobrepor-se no espectro, dadas as suas propriedades de ortogonalidade.

Além da otimização da banda, o OFDM minimiza de forma significativa a ISI (*Inter-Symbol Interference*), pois o tempo de símbolo do OFDM tende a ser longo comparativamente com o atraso das réplicas do sinal transmitido por multi-percurso.

No entanto, a existência de um canal com comportamento dispersivo na frequência revela-se consideravelmente problemática para sistemas baseados em OFDM, devido à possibilidade de interferência entre portadoras adjacentes ICI (*Inter-Carrier Interference*), podendo comprometer as propriedades de ortogonalidade [2]. A inexistência de métodos eficientes de supressão da ICI limitou o desempenho dos primeiros sistemas OFDM num canal submarino mas, atualmente, este é um dos principais tópicos de investigação.

Aproveitando o desenvolvimento na área de radiofrequência, algumas pesquisas sobre as comunicações submarinas passaram a dar destaque à técnicas de diversidade espacial, que recorrem a sistemas com múltiplos transmissores e receptores, conhecidos como MIMO. Estas técnicas oferecem um incremento linear da capacidade de um dado canal em função do número de transmissores ou receptores existentes, desde que a comunicação seja realizada num ambiente suficientemente dispersivo [2]. O aumento de capacidade obtido com o uso de MIMO ocorre não devido ao incremento da banda utilizada, mas sim devido a utilização da dimensão espacial, que permite a criação de um conjunto de canais de comunicação paralelos entre si.

Observa-se, portanto, que a tendência de investigação em ambientes submarinos se dá por combinar sistemas MIMO com a capacidade única da modulação OFDM.

#### 3.1. OFDM

OFDM é uma técnica de modulação multi-portadora baseada na multiplexação por divisão de frequência (FDM) que divide o espectro disponível em um grande número de portadoras ortogonais para transmitir dados em paralelo. Cada uma das portadoras ocupa uma fração da banda total e são ortogonais entre si para evitar que haja interferência entre elas [6].

Após passar pelos processos de entrelaçamento (*interleaving*), embaralhamento e incluir códigos de correção de erro, cada portadora transporta apenas alguns bits do sinal original. Assim, segmentos de um mesmo sinal são transmitidos por portadoras distantes entre si tanto no tempo como na frequência, resultando em imunidade ao sinal quanto à interferência em frequências específicas.

No OFDM o conceito de divisão de frequência é ampliado, pois as subportadoras são alocadas em frequências muito próximas resultando em uma ocupação espectral dezenas ou milhares de vezes menor do que no FDM [6]. Adicionado a isto, o uso de técnicas avançadas de modulação em cada subportadora resulta em um sinal com grande resistência à interferência. Na figura 3.1 é possível observar como é feito o espaçamento entre estas portadoras no tempo e na frequência.



Fig. 3.1: Espaçamento entre as portadoras no OFDM

As subportadoras no OFDM são moduladas utilizando métodos convencionais de modulação (QPSK, 16QAM, 64QAM etc.). A modulação a ser aplicada na portadora dependerá da distância entre transmissor e receptor e também da relação sinal ruído (RSR) desejável na comunicação. Através da combinação de centenas ou milhares de subportadoras, mesmo que cada uma tenha uma baixa taxa de transmissão, o resultado final são taxas de transmissão que se comparam aos métodos de modulação que utilizavam apenas uma portadora como o CDMA e o TDMA.

No domínio da frequência, múltiplas subportadoras possuem sua própria informação modulada de forma independente. Enquanto isso, no domínio do tempo, intervalos de guarda são inseridos entre cada símbolo transmitido para prevenir a interferência inter-simbólica no receptor, causada por um atraso de multipercurso no canal. Este intervalo que separa os símbolos de longa duração utilizados no OFDM é também chamado de prefixo cíclico. Ao fazer a amostragem do sinal recebido no tempo correto, o receptor pode remover a interferência no domínio do tempo entre símbolos adjacentes, que foram causados pelo multipercurso.

As novas tecnologias e os principais sistemas modernos de telecomunicações que utilizam transmissão tanto com fio quanto sem fio, têm adotado o OFDM como método de modulação, mostrando que este é realmente um método indicado para ambientes com grande reflexão de sinal.

Além disso, o OFDM é uma tecnologia adequada e bem preparada para o MIMO. A representação do sinal no domínio da frequência possibilita uma précodificação para combinar o sinal com as características de frequência e fase de um canal com multipercurso. Sendo assim, a tecnologia OFDM combinada com MIMO é mais robusta para situações de múltiplo percurso e maiores taxas de transmissão, já que juntas conseguem aproveitar melhor o sinal que chega ao receptor.

#### 3.2. MIMO

O MIMO é uma técnica que tem como objetivo minimizar os problemas causados pela interferência multipercurso. A ideia por tras desta tecnologia é baseada no fato de que as ondas ao se depararem com obstáculos passam a se propagar por diversos caminhos. Para as tecnologias anteriores essa reflexão das ondas não era desejada pois dificultava a recepção do sinal, mas o MIMO passa a utilizar este fenômeno de uma forma positiva. A técnica utiliza múltiplas antenas do lado do emissor e também do receptor, permitindo múltiplos envios de dados para aproveitar a diversidade do sinal.


Fig. 3.2: Multipercurso acústico submarino

Fonte: Modulation Analysis for an Underwater Communication Channel, Universidade do Porto (FEUP)

No MIMO, como as antenas são usadas tanto no transmissor (múltiplas saídas) quanto no receptor (múltiplas entradas), é possível que haja uma otimização tanto na transmissão do sinal quanto na recepção e interpretação do sinal. O acréscimo de antenas ao sistema possibilita que o sinal seja recebido com mais eficiência, pois torna-se possível captar as componentes do sinal que sofreram reflexão e desvios de trajetória ao longo da transmissão.

A quantidade de antenas utilizada nos transmissores e receptores varia de um aparelho para outro. Não é necessário que ambos possuam o mesmo número de antenas, embora a maior parte possua uma quantidade igual. As configurações mais comuns são pares 2x2 e 4x4.



Fig. 3.3: Esquema básico de antenas transmissoras e receptoras no modelo MIMO

Algumas antenas são capazes de receber energia a partir de uma direção particular, enquanto minimiza simultaneamente a energia de outra direção. Devido a esta propriedade de filtragem espacial são chamadas de antenas inteligentes. Conforme apresentado por Malburg em seu trabalho [9], as antenas inteligentes são dotadas de sensores, acoplados a um processador digital, que são capazes de interpretar o sinal captado através da aplicação de algoritmos que permitem um melhor aproveitamento do sinal.

Os receptores MIMO possuem filtros superpostos para a ponderação do espaço físico. Cada filtro é responsável por extrair um dos feixes recebidos por meio da anulação espacial dos feixes restantes. Essa filtragem não só permite o ganho de qualidade no sinal como também adiciona técnicas para melhor interpretar os sinais que chegam ao receptor após sofrer desvanecimento.

O MIMO apresenta subdivisões que variam de acordo com sua forma de funcionamento. Malburg [9] apresenta a primeira subdivisão como sendo a Transmissão por Diversidade de Espaço-Tempo (*Space Time Transmission Diversity* - STTD), onde uma quantidade de dados é codificada e enviada simultaneamente por diferentes antenas. Por enviar a mesma quantidade de dados por diferentes fontes ao mesmo tempo, a intensidade total do sinal enviado aumenta. Porém pode ocorrer um aumento do ruído na transmissão.

A segunda subdivisão é a Multiplexação Espacial (*Spatial Multiplexing* - SM), na qual os sinais são enviados em vários feixes que exploram o ambiente para alcançar o destino (a base receptora). Esse recurso é utilizado considerando as mudanças de direção do sinal quando este colide e sofre desvio nos vários obstáculos que podem existir no caminho entre o emissor e o receptor. Este modelo é o mais utilizado e o mais complexo dos 3 tipos pois é o que melhor utiliza os conceitos de propagação por caminhos múltiplos.

Conforme abordado em [9], outras subdivisões são possíveis, mas não serão apresentadas neste trabalho.

A integração entre as diferentes técnicas de modulação e a tecnologia MIMO garante um grande aproveitamento na transmissão dos sinais e também na sua recepção. Os pesquisadores apontam a utilização de MIMO como uma das alternativas mais viáveis para a melhoria da qualidade nas comunicações sem fio. O maior desafio desta tecnologia é garantir que o sistema tenha altas taxas de transmissão, especialmente quando utiliza altas taxas de modulação.

## 4. O ESQUEMA DE TRANSMISSÃO ALAMOUTI

O esquema de Alamouti é uma técnica simples de diversidade de transmissão que tem como objetivo melhorar a qualidade do sinal no receptor. Utilizando duas antenas transmissoras e uma antena na recepção o esquema consegue obter a mesma ordem de diversidade obtida pelo esquema MRRC (*maximal-ratio receiver combining*), que conta com uma antena transmissora e duas antenas receptoras.

Este esquema de diversidade de transmissão proposto por Alamouti tinha como objetivo complementar os estudos que já existiam sobre diversidade espacial, mas que se concentravam na recepção. Seu novo esquema de diversidade pôde melhorar as taxas de erro, a taxa de transmissão de dados, a capacidade dos sistemas de comunicações móveis e até mesmo aumentar a área de cobertura dos sistemas sem fio. O esquema pode ser combinado normalmente com os diversos tipos de modulação.

A estrutura principal de um sistema de codificação de bloco espaço-temporal com uma antena receptora (NR=1) é mostrada na figura 4.1.



Fig. 4.1: Estrutura de um esquema STBC.

Nesta estrutura, inicialmente os bits são mapeados em símbolos a[l], de acordo com a modulação utilizada. Em seguida, o codificador de bloco espaço-temporal (STBC - *space time block code*) coleta um bloco de k símbolos sucessivos e os mapeia em uma sequência de L vetores consecutivos, x[k] =  $[x_1[k] \cdot \cdots x_N^T[k]]^T$ ,  $0 \le k < L$ . Assim, os símbolos a[l] são codificados em duas dimensões: tempo e espaço.

Ao utilizar o STBC, é aplicada uma redundância ao sistema. Desta forma, o receptor receberá amostras diferentes de um mesmo símbolo que serão combinadas para que se possa extrair o máximo possível de informação com uma menor margem de erros.

O esquema de Alamouti opera dentro deste princípio de codificação espaçotemporal e, conforme dito anteriormente, emprega duas antenas transmissoras (Nt=2) e uma antena receptora (Nr=1). Portanto, deve-se utilizar blocos de 2 símbolos consecutivos (k=2), sendo  $a_0 = a[21] e a_1 = a[21+1]$ .

No primeiro instante de tempo, a primeira antena deve transmitir  $x_0[2k] = a_0/\sqrt{2}$ e a segunda antena deve transmitir  $x_1[2k] = a_1/\sqrt{2}$ .

No próximo instante, a primeira antena deve transmitir  $x_0[2k + 1] = -a_1^*/\sqrt{2} e a$  segunda antena deve transmitir  $x_1[2k + 1] = a_0^*/\sqrt{2}$ .

Este arranjo espaço-temporal pode ser escrito em notação vetorial, da forma:

$$\mathbf{X}_{2} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}[2k] & \mathbf{x}[2k+1] \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} a_{0} & -a_{1}^{*} \\ a_{1} & a_{0}^{*} \end{bmatrix}$$
(5)

Pode ser observado que nas colunas estão os símbolos transmitidos em determinado instante enquanto que nas linhas estão os símbolos transmitidos por cada antena. O fator  $1/\sqrt{2}$  é usado para garantir que a potência média total transmitida por símbolo seja  $E_s/T_s$ .

	Antena 1	Antena 2
Instante t	S <sub>0</sub>	<b>S</b> <sub>1</sub>
Instante t+T	-s <sub>1</sub> *	$\mathbf{S_0}^*$

Tabela 4.1.- Codificação espaço-temporal do esquema de Alamouti

É importante observar que o esquema de Alamouti não fornece ganho de codificação. Sua taxa de código é  $R_c$ = K/L = 2/2 = 1. Isto também pode ser observado verificando que as colunas em X<sub>2</sub> (5) são ortogonais. O esquema completo pode ser observado nas imagens abaixo.



Fig. 4.2: Diagrama de codificação.



Fig. 4.3: Esquema de diversidade de transmissão proposto por Alamouti.

A partir do esquema mostrado no diagrama de codificação sabe-se que, conhecidos os sinais transmitidos e conhecido o canal, pode-se identificar os sinais recebidos em cada instante de tempo.

$$r_{0} = r(t) = h_{0}s_{0} + h_{1}s_{1} + n_{0}$$

$$r_{1} = r(t+T) = -h_{0}s_{1}^{*} + h_{1}s_{0}^{*} + n_{1}$$
(6)

Na equação (6)  $n_0 e n_1$  são variáveis complexas que representam o ruído introduzido na transmissão e a interferência. Desta forma, é possível escrever uma combinação destes sinais, através do elemento combinador e gerar os seguintes sinais, que posteriormente são enviados ao detector de máxima verossimilhança, ou decisor:

$$\widetilde{s}_{0} = h_{0}^{*} r_{0} + h_{1} r_{1}^{*}$$

$$\widetilde{s}_{1} = h_{1}^{*} r_{0} - h_{0} r_{1}^{*}$$
(7)

O esquema de Alamouti pode ser facilmente generalizado para duas antenas transmissoras e M antenas receptoras, para prover diversidade na ordem de 2M. Isto pode ser feito sem qualquer realimentação do receptor para o transmissor e com reduzida complexidade computacional.

O padrão UMTS (3GPP), que trata das comunicações móveis terrestres, adotou uma maneira diferente de aplicar o esquema de Alamouti, sem alterar o ganho de diversidade que o mesmo proporciona. Nesta implementação, a matriz de códigos é escrita da seguinte maneira:

$$\mathbf{X}_{2} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}[2k] & \mathbf{x}[2k+1] \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} a_{1} & a_{2} \\ -a_{2}^{*} & a_{1}^{*} \end{bmatrix}$$
(8)

A vantagem de utilizar esta implementação é que os símbolos originais ( $s_1 e s_2$ ) são transmitidos pela mesma antena. Desta forma, a antena é utilizada como se não estivesse sendo empregado o sistema de diversidade e apenas a outra antena requer processamento adicional do sinal.

#### 4.1. TRANSMISSÃO OFDM COM O ESQUEMA DE ALAMOUTI

O código de diversidade de Alamouti vem sendo investigado juntamente com a técnica OFDM, a fim de se obter altas taxas de transmissão nas comunicações submarinas, sobre canais variantes no tempo. Os resultados iniciais positivos do OFDM em ambientes submarinos motivaram a investigação das técnicas MIMO e OFDM combinadas, utilizadas para a obtenção de ganho por multiplexação espacial [12], [13].

Em [10] é realizado um estudo de um sistema Alamouti utilizando modulação OFDM. Este trabalho apresenta um modelo para estimativa do canal submarino, baseado em [12], que é utilizado para uma simulação de transmissão de dados sobre um canal de águas calmas de 10 khz de banda. A experiência conta com um *array* transmissor de 2 elementos a 10m de profundidade e um receptor a 15m de profundidade, afastado 1 km do receptor.

Durante 3 dias de experimento foram realizadas 19 transmissões e medição dos resultados. O resultado obtido pelo experimento para cada uma das 19 transmissões é mostrado nas figuras 4.4 e 4.5, e estimam as taxas de erro do sistema.



Fig. 4.4: Taxa de erro para sistema Alamouti com modulação OFDM com 512 portadoras (K=512). O EMQ do sistema foi de 3,2dB.



Fig. 4.5: Taxa de erro para sistema Alamouti com modulação OFDM com 1024 portadoras (K=1024). O EMQ do sistema foi de 4,0dB.

Apesar dos bons resultados obtidos, mostrando que a taxa de erros do sistema Alamouti mantém-se sempre menor do que a taxa de erros do sistema SIMO, o trabalho ressalta que é necessário aprimorar os esquemas de estimativas do canal a fim de diminuir a complexidade computacional ainda existente. A estimativa de canais adaptativos para sistemas com codificador de bloco espaço-temporal sistemas OFDM tem sido bastante estudada para comunicação terrestre [14], [15]. Para canais submarinos, tem sido considerados sistemas STBC tanto para sistemas de portadora única [16], como para multiportadora [17], [18].

# 5. SIMULAÇÕES DE TRANSMISSÃO SUBMARINA COM ESQUEMA DE ALAMOUTI

Neste capítulo, o esquema de codificação de Alamouti é investigado em conjunto com a modulação OFDM. Para a obtenção e análise de resultados teóricos que permitam o estudo deste sistema, desenvolveu-se no Matlab, no ambiente do Simulink, os esquemas que serão apresentados a seguir. Com estes esquemas espera-se poder comprovar a melhora na transmissão de dados submarina utilizando o sistema de Alamouti combinado com OFDM, quando comparado à transmissão utilizando apenas modulação OFDM.

Esta melhora é esperada pois, conforme visto anteriormente, o esquema de Alamouti é um esquema de diversidade que utiliza duas antenas transmissoras, o que faz com que o sinal fique menos sujeito a interferências causadas por efeito do fenômeno de multipercurso. Somado a isso, o esquema propõe um processamento no sinal a ser transmitido que por não ser muito complexo, facilita a implementação do sistema.

### 5.1. MODELO DE TRANSMISSÃO SUBMARINA COM OFDM

Este primeiro esquema simula a transmissão de dados em ambiente submarino utilizando um transmissor, um receptor e modulação OFDM. Os dados enviados são gerados segundo um modelo de distribuição binária de Bernoulli. Os dados recebem codificação turbo 2:1 e em seguida são modulados em 16-QAM. Após a modulação, o sinal é normalizado e então transmitido através da técnica OFDM. Para o canal, o sistema utilizado considera que há desvanecimento de Rayleigh<sup>4</sup> e ruído branco

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Diversos autores utilizam ou fazem referência à utilização do modelo de Rayleigh para simulação do comportamento do canal submarino. [20], [21], [27]

(AWGN) atenuando e modificando o sinal. A relação sinal ruído nas simulações é de 20 dB.



Fig. 5.1: Esquema de transmissão 1, com modulação OFDM.

Após passar pelo canal, um analisador de espectro faz uma leitura do sinal. Neste momento, é possível analisar através da forma de onda do sinal que o ruído e o desvanecimento causam no espectro uma deformação que pode acarretar em erros na detecção do sinal.

As figuras abaixo mostram o espectro do sinal após a transmissão, a distribuição dos símbolos recebidos e a resposta em frequência do canal em três momentos distintos.



Fig. 5.2: Amostra 1 do sinal, após transmissão de 7.200 símbolos pelo sistema 1: a)Espectro do sinal; b) Resposta em frequência do canal; c) Distribuição dos símbolos recebidos.



Fig. 5.3: Amostra 2 do sinal, após transmissão de 20.400 símbolos pelo sistema 1: a)Espectro do sinal; b) Resposta em frequência do canal; c) Distribuição dos símbolos recebidos.

-0.5 0 In-phase Amplitude

(C)

0.5

1

1.5

-1.5 -1.5

-1



Fig. 5.4: Amostra 3 do sinal, após transmissão de 31.200 símbolos pelo sistema 1: a)Espectro do sinal; b) Resposta em frequência do canal; c) Distribuição dos símbolos recebidos.

Após a recepção do sinal e sua recuperação em banda base, um circuito realiza o cálculo da taxa de erros do sistema, de forma que se pode observar a quantidade de dados que não é detectada corretamente pelo sistema. A informação é fornecida em um vetor de três linhas no qual o primeiro valor indica a taxa de erros do sistema, o segundo valor mostra o número de erros detectados pelo sistema até o momento e o terceiro valor corresponde ao número total de símbolos analisados. É possível observar no esquema da figura 5.1 que este cálculo é feito comparando-se a sequência de bits transmitidos com a sequência de bits recebidos.



Fig. 5.5: Taxa de erro do sistema 1: a)Amostra 1; b) Amostra 2; Amostra 3.

Para este sistema inicial, os resultados obtidos mostram que a transmissão digital de dados através de um canal com as características descritas, utilizando as modulações e codificações propostas, é afetada de tal maneira que parte da informação torna-se irrecuperável no detector.

O detector de erro do sistema mostra que durante toda a transmissão uma grande quantidade de dados é decodificada de forma incorreta. Na primeira amostra a taxa de erro era de 3,3%. Na segunda amostra a taxa de erro era de 4,5% e na última amostra esta taxa variou pouco, ficando em o torno de 4,8%. Os valores obtidos para as taxa de erro são bastante altos para um sistema de comunicação e impactam diretamente na qualidade da informação recebida.

Analisando ainda a distribuição dos símbolos recebidos em cada momento, nota-se que os erros ocorrem porque o sinal transmitido é muito afetado pelo ruído do canal e também pelo desvanecimento. Mesmo com a codificação e com a modulação OFDM, o receptor não é capaz de recuperar corretamente os dados para uma grande porcentagem dos bits transmitidos.

Nesta primeira análise também é possível observar que o sistema não consegue recuperar de forma eficiente os símbolos que são afetados pelo desvanecimento seletivo do canal. Esta característica pode ser observada com maior clareza na figura 5.6, onde há um pico de atenuação nas frequências entre 2 MHz e 3 MHz e consequentemente uma forte atenuação do sinal nesta frequência. Durante o período onde a atenuação do sinal é mais intensa, o sistema registra 576 erros de símbolos, em um universo de 9600 símbolos transmitidos. Isso corresponde a uma taxa de erro de aproximadamente 6% neste período.



Fig. 5.6: Comportamento do sistema 1 durante período de desvanecimento seletivo.

## 5.2.MODELO DE TRANSMISSÃO SUBMARINA COM OFDM E O ESQUEMA DE ALAMOUTI

A fim de se obter uma melhora no desempenho do sistema apresentado no item anterior, uma nova configuração é criada para a elaboração de testes. Neste novo cenário, o modelo de Alamouti é aplicado com o intuito de aproveitar as características do canal submarino para melhorar a decodificação de dados na recepção, uma vez que o esquema de Alamouti utiliza a diversidade espacial para garantir uma menor margem de erro na recuperação do sinal transmitido.

A figura 5.7 mostra o esquema de Alamouti que foi montado e utilizado nesta etapa da simulação.



Fig. 5.7: Esquema de transmissão de Alamouti.

Neste esquema, o OSTBC Encoder é o bloco responsável por gerar o código de Alamouti que será utilizado para mapear os símbolos a serem transmitidos, conforme mostrado na tabela 4.1. A entrada deste bloco deve ser um vetor [Tx1] onde T é o comprimento da sequência de símbolos. Conforme visto no capítulo 4, no esquema de Alamouti o codificador deve receber blocos de 2 símbolos. A saída do bloco terá dimensão [T/RxN] onde R é a taxa de código e N o número de antenas transmissoras.



Após passar pelo codificador, os dados passam por dois circuitos seletores, onde os dados da matriz de entrada são reordenados em vetores. Em seguida, as saídas dos dois seletores são somadas e serão recebidas pelo decodificador Alamouti, assim como a matriz de estimativa do canal. Enfim, o decodificador utiliza os dados recebidos e decodifica o sinal recebido por meio do código de Alamouti.

Neste segundo esquema de simulação, foram mantidas todas as características especificadas no esquema anterior. Porém, agora, o modelo de Alamouti é inserido no momento anterior à modulação OFDM. Com isso, os dados são mapeados pela codificação de Alamouti antes de serem alocados nas múltiplas portadoras.

Após receberem a modulação OFDM, os sinais são transmitidos por duas antenas distintas através do mesmo canal, porém cada uma das amostras encontra diferentes condições de propagação ao longo de sua trajetória até o receptor. Através de sinais pilotos transmitidos por ambas as antenas transmissoras é realizada uma estimativa do canal por meio da técnica LMS. O decodificador de Alamouti utiliza a ponderação da estimativa de cada um dos canais para decodificar a informação.



Fig. 5.8: Esquema de transmissão 2, com modulação OFDM e codificação de Alamouti.

Nos testes realizados por meio de simulação, apresentados nas figuras seguintes, é possível observar que há uma melhora na recepção dos dados. Isto pode ser concluído através da análise dos espectros, da distribuição dos símbolos recebidos e decodificados pelo sistema e principalmente pelas taxas de erro do sistema.

Cada um dos espectros representados nas figuras corresponde ao sinal enviado por um dos dois transmissores do sistema. Associada a cada espectro está a resposta em frequência do canal por onde ele se propaga.



Fig. 5.9: Amostra 1 do sinal, após transmissão de 7.200 símbolos pelo sistema 2: a)Espectro do sinal; b) Resposta em frequência do canal; c) Distribuição dos símbolos recebidos.



Fig. 5.10: Amostra 2 do sinal, após transmissão de 20.400 símbolos pelo sistema 2: a)Espectro do sinal; b) Resposta em frequência do canal; c) Distribuição dos símbolos recebidos.



Fig. 5.11: Amostra 3 do sinal, após transmissão de 31.800 símbolos pelo sistema 2: a)Espectro do sinal; b) Resposta em frequência do canal; c) Distribuição dos símbolos recebidos.

Ao analisar as amostras dos símbolos recebidos, distribuídos nos quadrantes, notase que há uma melhora no sistema pois os símbolos são recebidos em níveis mais próximos dos valores esperados. Isto garante ao sistema uma maior probabilidade de detectar corretamente o símbolo enviado. Também reflete a melhora do sistema, uma vez que os símbolos recebidos estão mais próximos dos pontos estimados, o que resulta em menos erros de decodificação.



Fig. 5.12: Níveis reais dos símbolos transmitidos.

Com isso, nota-se que apesar de o ruído continuar interferindo e o desvanecimento causar variações na amplitude do sinal, este sistema está mais apto a recuperar corretamente o sinal do que o sistema anterior.

Para comprovar o que foi analisado nos gráficos do sistema 2, pode-se fazer uma análise das taxas de erro obtidas para cada uma das amostras e comparar com as taxas de erro obtidas no sistema 1.



Fig. 5.13: Taxa de erro do sistema 2: a )Amostra 1; b) Amostra 2; Amostra 3

Realizando uma breve comparação entre os dois sistemas, pode-se observar que no momento em que o sistema 2 havia transmitido 20.400 símbolos, 443 destes símbolos foram detectados incorretamente. No sistema 1, para a mesma quantidade de símbolos transmitidos, a quantidade de erros foi de 918 símbolos. Ou seja, no sistema 1 registrou-se mais do que o dobro de erros do sistema 2. A taxa de erro para esta situação caiu de 4,5% para 2,1%.

Na terceira amostra do sistema 1, havia sido transmitidos 31.200 símbolos. Dentre eles, 1.505 foram detectados com erro. Por outro lado, a terceira amostra do sistema 2 mostra que no momento em que 31.800 símbolos haviam sido transmitidos, apenas 624 foram detectados incorretamente. A quantidade aproximada de 1.505 erros só foi atingida pelo sistema 2 quando 57.500 símbolos já haviam sido transmitidos.

Desta maneira, comprova-se a análise feita pela observação gráfica dos dois sistemas de que a taxa de erros do primeiro modelo supera a taxa de erros do sistema onde o código de Alamouti é utilizado.

Além disso, é possível observar que o problema do desvanecimento seletivo causado pelo multipercurso passa a interferir menos no sistema. Por haver diversidade espacial na transmissão, o sistema consegue recuperar de forma mais eficiente os símbolos que são afetados pelo desvanecimento seletivo do canal. Esta característica pode ser observada com maior clareza na figura 5.14, onde há um pico de atenuação próximo a frequência de 0MHz em um dos canais e consequentemente uma forte atenuação do sinal nesta frequência.





Fig. 5.14: Comportamento do sistema 2 durante período de desvanecimento seletivo.

Durante o período onde a atenuação do sinal é mais intensa, o sistema registra 442 erros de símbolos, em um universo de 9000 símbolos transmitidos. Isso corresponde a uma taxa de erro de aproximadamente 4,9% neste período. Comparando com o sistema 1, é possível concluir que a diversidade existente no sistema 2 oferece uma proteção contra o desvanecimento seletivo pois no momento em que um canal apresenta um pico de atenuação, o outro canal mantém um nível de resposta no qual o sinal pode ser recuperado. Assim, apesar de um canal atenuar fortemente o sinal, os dados podem ser recuperados através da informação vinda do outro canal.

Com os dados apresentados nestas simulações, conclui-se que a configuração que utiliza o esquema de Alamouti oferece uma melhora na taxa de erro do sistema, o que comprova que a combinação das tecnologias é uma prática eficiente para ser aplicada nas condições descritas de canal.

Na figura 5.15 o gráfico mostra o comportamento dos sistemas quando submetidos a diferentes valores de relação sinal-ruído. Neste gráfico é possível observar que o sistema dois apresenta taxas de erro inferior ao sistema um para todas os valores de RSR. O sistema que emprega a técnica de Alamouti apresenta desempenho ainda melhor quando submetido baixos níveis de RSR. Para altos níveis de RSR o ganho do sistema 2 em relação ao sistema 1 passa a ser muito pequeno.



Fig. 5.15: Comparação entre as taxas de erro dos sistemas para diferentes valores de RSR.

### 6. CONCLUSÃO

O ambiente submarino é de fato um meio desafiador para a implantação de comunicação sem fio eficiente. Conforme visto, as tecnologias sem fio em rádio frequência já desenvolvidas não se aplicam a este ambiente devido às fortes atenuações a que as ondas eletromagnéticas são expostas. Por esta razão, o estudo das comunicações submarinas deve seguir na área da comunicação acústica, já que os trabalhos recentes mostram que a aplicação desta técnica tem sido satisfatória e tem apresentado evolução.

O presente trabalho apresentou uma proposta de sistema que tem como objetivo amenizar as dificuldade encontradas na transmissão submarina e avançar nas áreas de estudo já iniciadas. Para isto, foi considerada uma técnica de modulação cuja eficiência já é comprovada e um sistema de diversidade com baixo grau de dificuldade de implementação.

Antes de apresentar os testes, o trabalho trouxe uma visão geral sobre a atual situação das comunicações submarinas, os avanços alcançados e as dificuldades ainda existentes. Além disso, foi feita uma análise do comportamento das ondas acústicas no meio submarino.

Após realizar as simulações e observar os resultados obtidos, conclui-se que a combinação das técnicas de diversidade com técnicas robustas de modulação podem ser a principal direção para vencer as dificuldades encontradas no ambiente submarino. Além de ter sido obtido uma melhora de aproximadamente 2,5% na taxa de erro em caso de desvanecimento seletivo, observa-se no gráfico comparativo da figura 5.15 que o segundo sistema pode oferecer ganhos ainda maiores para baixos níveis de RSR. Para uma taxa de erro de 0,2 o ganho do sistema 2 em relação ao sistema 1 é de aproximadamente 6,8 dB. Se considerarmos uma taxa de erro de 0,025 o ganho do sistema 2 passa a ser de aproximadamente 10 dB.

No entanto, é necessário que sejam feitos mais estudos explorando as diversas possibilidades de diversidade espacial tanto na transmissão quanto na recepção, a fim de se chegar cada vez mais próximo de um modelo que ofereça condições confiáveis de transmissão utilizando taxas tão elevadas quanto possível.

A diminuição na taxa de erros obtida com a utilização do esquema de Alamouti é um passo inicial para proporcionar melhorias nos sistemas de comunicação submarinos, já que o modelo de Alamouti possui baixa complexidade de implantação e oferece significativa melhora para o sistema.

Em resumo, conclui-se que os resultados teóricos obtidos correspondem às previsões iniciais e indica que é possível continuar avançando nas técnicas de comunicação acústica submarina por meio do aprimoramento das técnicas de diversidade MIMO. Muitos testes ainda devem ser feitos para que se chegue à configurações de maior eficiência.

No entanto, cabe observar que a comunicação depende muito do canal onde ela é realizada, que neste caso apresenta muitas variáveis. Por esta razão, é provável que diferentes configurações de sistemas funcionem melhor em canais com determinadas características. Assim, é muito importante que os testes práticos sejam realizados em diferentes ambientes para que seja validada a eficiência dos sistemas.

#### 6.1. TRABALHOS FUTUROS

No decorrer de uma dissertação surgem ideias que permitem expandir ou melhorar alguma característica do trabalho desenvolvido, mas que não são possíveis de serem abordadas, por fugir muito ao escopo inicial, por demandar muito tempo de pesquisa ou pela dificuldade de acesso a determinados recursos. Apesar de não serem abordadas ao longo do trabalho, estas ideias podem ser úteis para o desenvolvimento

do tema em estudo e devem ser sugeridas como temas a serem explorados em novos trabalhos.

O tema apresentado por esta dissertação é avaliado por meio de simulações em software. O próximo passo para esta pesquisa seria a tentativa de implementar um sistema similar e realizar testes físicos, para validar os resultados obtidos nas simulações. Desta forma, a base de pesquisa do trabalho abre espaço para trabalhos futuros que venham a aperfeiçoá-la.

Um outro passo que pode ser dado nesta linha de pesquisa é o estudo da acústica submarina utilizando OFDM e empregando um maior grau de diversidade. Seria de grande utilidade a implementação de um sistema que permitisse testes para diversidade 1x3, 1x4 até 1xN, onde poderá ser avaliado o ganho dos sistemas quando for utilizado um array de hidrofones na recepção e fazer uma análise comparativa com os resultados já obtidos neste trabalho.

Com relação à estimativa do canal, é possível que sejam feitas pesquisas para desenvolver ainda mais os softwares que fazem a estimativa e simulação do canal submarino. Este é um grande desafio, visto as características muito particulares do canal. Alguns *softwares* já realizam esta estimativa, mas mesmo estes ainda não estão muito próximos das características reais.

Cientistas da Instituição Oceanográfica Woods Hole, dos Estados Unidos, desenvolveram um sistema de comunicação ótica que complementa e se integra com os sistemas acústicos para permitir taxas de transmissão de dados de 10 a 20 Mb/s, com um alcance de 100 metros. Tendo em vista que este é um tema que ainda pode ser bastante explorado, um ramo possível de pesquisa é a integração de sistemas acústicos com sistemas óticos.

68

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Mário J. V. Lopes, "Comunicações digitais através de ultra-sons em ambientes subaquáticos", Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012

[2] M. Stojanovic, "Underwater Acoustic Communication," em For the Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 2000.

[3] M. Stojanovic e J. Preisig, "Underwater Acoustic Communication channels - Propagation models and statistical characterization," em Communications Magazine, IEEE Volume 47, 2009.

[4] J. A. Nystuen, Listening to raindrops from underwater: An acoustic disdrometer, J Atmospheric and Oceanic Technology, 18(10), 1640-1657 (2001).

[5] L. Liu, S. Zhou e J. Cui, "Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks," Wiley WCMC Special Issue On Underwater Sensor Networks, 2008.

[6] P. Marques e N. Cota, Material de apoio à unidade curricular de Teledifusão Digital - "Orthogonal Frequency Division Multiplexing", Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2007/2008.

[7] Jordi Ribas, "Underwater Wireless Video Transmission using Acoustic OFDM", Massachusetts Institute of Technology

[8] L. C. Godara, Smart Antennas, CRC Press LCC, New York, 2004.

[9] M.Malburg, "Trabalho Final de Redes I - Tema: Modulação", UFRJ, 2004

[10] Baosheng Li, M. Stojanovic, "Alamouti space time coded OFDM for underwater acoustic channels", Dept. of Elec. and Computer Eng., Northeastern University, Boston, MA 02115.

[11] Dan Russell, "Acoustics and Vibration Animations", http://www.acs.psu.edu/drussell/demos.html

[12] M. Stojanovic, "MIMO OFDM over underwater acoustic channels," in Proc. 43rd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, Nov. 7-10, 2009.

[13] B. Li, J. Huang, S. Zhou, K. Ball, M. Stojanovic, L. Freitag, and P. Willett, "MIMO-OFDM for high-rate underwater acoustic communications," IEEE Journal of Oceanic Eng., vol. 34, no. 4, pp. 634–644, Oct. 2009.

[14] W. M. Younis, A. H. Sayed, and N. Al-Dhahir, "Efficient adaptive receivers for joint equalization and interference cancellation in multiuser space-time block-coded systems," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 51, no. 11, pp. 2849–2862, Nov. 2003.

[15] M. Zhao, Z. Shi, and M. C. Reed, "An iterative receiver with channel estimation for MIMO-OFDM over a time and frequency dispersive fading channel," in Proc. of Global Telecommunications Conference, Washington, DC, Nov. 26-30, 2007, pp. 4155–4159.

[16] S. Roy, T. Duman, V. McDonald, and J. Proakis, "High-rate communication for underwater acoustic channels using multiple transmitters and space-time coding: receiver structures and experimental results," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 32, no. 3, pp. 663–688, Jul. 2007.

[17] R. F. Ormondroyd and J. S. Dhanoa, "Comparison of space-time block code and layered space-time MIMO systems for an underwater acoustic channel," in Proc. of IEEE/MTS Oceans Conf., Europe, June 20-23 2005.

[18] Siavash M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications".

[19] M. Stojanovic, "On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel" In WUWNet, Los Angeles, CA, 2006.

[20] M. Stojanovic, "Recent Advances in High-speed Underwater Acoustic Communications", IEEE Journal of Oceanic Engineering, volume 21, 1996

[21] C. Carbonelli and U. Mitra, "Cooperative multihop communication for underwater acoustic networks" In WUWNet, New York, 2006

[22] Volker Kühn, "Wireless Communications over MIMO Channels: Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems".

[23] Jie Huang, Jianzhong Huang, Christian R. Berger, Shengli Zhou, and Peter Willett, "Iterative Sparse Channel Estimation and Decoding for Underwater MIMO-OFDM", University of Connecticut, Storrs, CT 06269, USA

[24] S.M. Jesus, C. Soares, F. Zabel e A. Silva, "Marine Strategy Framework Directive Descritor 11 - Ruído Ambiente Submarino", CINTAL, Universidade do Algarve e Marsensing Lda, 2011

[25] M. L. Nordenvaad and T. Oberg, "Iterative reception for acoustic underwater MIMO communications," in Proc. of IEEE/MTS Oceans Conf., Boston, MA, Sept. 18-21, 2006.

[26] B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, L. Freitag, J. Huang e P. Willett, "MIMO-OFDM Over An Underwater Acoustic Channel," em OCEANS, 2007.

[27] L. M. Brekhovskikh and Y. Lysanov, "Fundamentals of Ocean Acoustics", 2003.

## 8. SITES CONSULTADOS

http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=comunicacao-opticasubmarina&id=010180100628

http://en.wikipedia.org/wiki/Underwater\_acoustic\_communication

http://en.wikipedia.org/wiki/SOSUS

http://en.wikipedia.org/wiki/Integrated\_Undersea\_Surveillance\_System\_insignia

http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue\_25/sosus.htm

http://www.fas.org/irp/program/collect/sosus.htm

### **ANEXO A – Histórico das Comunicações Submarinas**

O Sound Surveillance System (SOSUS) foi um sistema composto por arrays de alto ganho que provia capacidade de detecção a longas distâncias em águas profundas. Por volta de 1950, durante a guerra fria, este sistema foi muito bem sucedido na missão de rastrear ameaças submarinas através de seus sinais acústicos.

A marinha americana começou a utilizar sistemas SOSUS, com hidrofones pousados no fundo do mar e conectados por cabos submarinos, com a finalidade de monitorar submarinos soviéticos. O sistema fazia parte da tática de guerra e por isso seus hidrofones estava implantado em pontos espalhados pelo mundo. Um deles estava localizado na rota entre Groelândia, Islândia e Reino Unido, sendo conhecido como GIUK. Havia pontos de monitoramento instalados também no Oceano Pacífico.

Entre os anos de 1970 e 1980 o SUSU foi sofrendo redução no número de estações de monitoramento. Com o fim da Guerra Fria em 1990 o sistema começou a perder a sua finalidade e mais tarde, estes hidrofones foram substituídos por equipamentos sem fio que deram origem a novos sistemas como o SURTASS (*Surveillance Towed Array Sensor System*) e passaram a fazer parte do IUSS (*Integrated Undersea Surveillance System*).

No entanto, o fim da Guerra Fria eliminou muito da necessidade de manter o sistema IUSS operando em alta capacidade. Mesmo estando praticamente desativado, o IUSS era considerado um segredo, ainda que todos tivessem conhecimento de sua existência.

Com a avanço das tecnologias, chegou-se a conclusão de que as estações de monitoramento deveriam ficar localizadas em terra, pois assim resistiriam melhor ao tempo. Desta forma, até o final do ano de 1998 os sistemas Shore Signal Information *Processing Segment* (SSIPS) e o Surveillance Direction System (SDS) foram instalados como bases de monitoramento em solo, reduzindo significativamente os custos de suporte e infraestrutura do sistema.

72
Apesar dos esforços aplicados na melhoria das bases e dos sistemas de monitoramento, os submarinos também começaram a passar por forte desenvolvimento. Ao longo dos anos, ficaram mais silenciosos, passaram a utilizar baterias com maior poder de armazenamento e passaram também a contar com equipamentos que inibiam a ação dos rastreadores acústicos.

O SUSUS é ameaçado quando ocorre o fenômeno da ressurgência nos oceanos. A manutenção dos componentes submarinos do sistema IUSS é realizado por técnicos e engenheiros que operam a partir de navios de apis do IUSS.

Os arrays remanescentes do SOSUS estão atualmente em modo stand by, no qual os dado continuam disponíveis porém não são monitorados. Os arrays existentes no norte do Oceano Pacífico têm sido analisados para serem usados em sistemas de baixa frequência para captação de vocalização de mamíferos marinhos.

Existe um outro sistema que é responsável por monitorar os sons de baixa frequência no canal SOFAR utilizando múltiplos pontos de escuta equipados com hidrofone e uma técnica de processamento capaz de detectar a posição de submarinos a centenas de quilômetros por meio de técnicas de triangulação.

## **ANEXO B - Ruídos Submarinos**

Os oceanos mundiais estão saturados com ruídos. Estudos apontam que nos últimos 60 anos os sons submarinos de baixa frequência aumentaram em mais de duas ordens de magnitude no Hemisfério Norte.

Outros estudos afirmam que o número de navios que cruzam os oceanos triplicou nos últimos 50 anos [24]. Além de trafegarem um quantidade muito maior de horas anualmente, os navios modernos são muito maiores e ruidosos do que os navios de algumas década atrás. Houve, portanto, um aumento de tráfego e consequentemente do ruído gerado, compreendidos na faixa entre 50Hz e 300 Hz.

Para se referir a este tipo de ruído utiliza-se habitualmente a designação de "ruído acústico submarino". A energia que gera estes ruídos acontece principalmente sob forma de pressão sonora (ondas acústicas). Os ruídos submarinos podem ser separados em duas sub componentes que são o ruído impulsivo, normalmente de forte intensidade mas de curta duração, e o ruído ambiente ou ruído de fundo, normalmente de fraca intensidade e fraca diretividade espacial mas de expressão contínua no tempo.

Os ruídos gerados pela atividade humana contribuem com uma importante percentagem do ruído submarino total. Os ruídos desta natureza cobrem uma extensa faixa de frequências que vai desde alguns Hz até centenas de kHz. As principais fontes de ruído de origem antrópica podem ser classificadas em três grandes grupos:

1. sondas acústicas, sonares, modems acústicos, *pingers* e todos os outros equipamentos acústicos de transmissão de dados, de posicionamento, de investigação ou de prospecção;

2. construções submarinas;

3. navios de transporte, de pesca e outros veículos submarinos ou de superfície;

As fontes de tipo 1 e 2 são de forte amplitude, direcionais, de curta duração e de caráter esporádico. O ruído produzido por estas fontes pode ser muito nocivo e causar um forte impacto no meio. No entanto, este ruído é fortemente atenuado com a

distância, dado que são essencialmente fontes com componentes de frequência elevada.

A organização britânica *Whale and Dolphin Conservation Society* (WDCS) considera como principiais fontes de ruídos marinhos a utilização de sonares militares de baixa frequência e a pesquisa submarina de gás e petróleo, pois estas atividades geram o aumento de testes sísmicos para localização das jazidas de combustíveis fósseis.

Os equipamentos de medição de ruído submarino permitem normalmente distinguir os vários tipos de origem de ruído a partir das suas principais características (intensidade, diretividade, frequência e duração). Em alguns casos não é fácil distinguir o ruído antrópico do ruído de origem natural ou animal pois ambos podem apresentar características muito semelhantes.

De forma geral existem escassas informações sobre medidas dos ruído submarinos. É provável se conheça apenas uma pequena parte dos sons produzidos e utilizados pelas espécies submarinas. No entanto, para a realização de estudos e pesquisas é de grande validade ter conhecimentos dos ruídos produzidos com mais frequência nos oceanos.

Nas tabelas abaixo é possível encontrar as principais fontes de ruídos submarinos e seus níveis médios de intensidade.

Fonte do Ruído	Níveis de Intensidade da Fonte (dB submarino a 1 m)
Sons da Baleia Cachalote	163 - 236
Sons de ecolocalização da Baleia Beluga	206 – 225 (pico-a-pico)
Sons de ecolocalização do Golfinho de Bico Branco	194 – 219 (pico-a-pico)
Sons pulsantes do Golfinho Rotador	108-115
Vocalização do Golfinho Comum	125-173
Vocalização da Baleia Fin	155 – 186
Vocalização da Baleia Azul	155 – 188
Vocalização da Baleia Jubarte	142 - 185
Canto da Baleia Bowhead (Baleia da Groelândia)	128 – 189
Canto da Baleia Humpback	144 – 174
Camarão Snapping	183 – 189 (pico-a-pico)

## Tabela 2.- Níveis de Intensidade de ruídos emitidos pela fauna marinha

Tabela 3.- Níveis de Intensidade de ruídos gerados por atividade humana

Navios em Movimento	Níveis de Intensidade da Fonte
	(ub submarmo a 1 m)
Tug and Barge (18 km/hour)	171
Navio de Abastecimento (Kigoriak)	181
Grande Petroleiro	186
Quebrador de gelo	193

Pesquisa Sísmica	Níveis de Intensidade da Fonte (dB submarino a 1 m)
Array de armas de ar (32 armas)	259 (peak)

SONAR Militar	Níveis de Intensidade da Fonte (dB submarino a 1 m)
AN/SQS-53C (SONAR tático de meia frequência - U. S. Navy , frequencias centrais 2.6 and 3.3 kHz)	235
AN/SQS-56 (U. S. Navy sonar de frequência media tática, frequências centrais 6.8 to 8.2 kHz)	223
SURTASS-LFA (100-500 Hz)	215 dB para um único projector, com até 18 projetores projetores operando simultaneamente em <i>array</i> vertical

Estudos Oceanográficos	Níveis de Intensidade da Fonte (dB submarino a 1 m)
Heard Island Feasibility Test (HIFT) (Frequência central 57 Hz)	206 dB para um projector, com até 5 projetores operando em um array vertical
Termometria Acústica (Frequência central 75 Hz) North Pacific Acoustic Laboratory (NPAL)	195

## **ANEXO C – Temperatura dos Oceanos**

A densidade da água é o fator que controla os movimentos verticais da água do mar e depende diretamente da salinidade e dos valores de temperatura. Em geral, a densidade aumenta com a profundidade dos oceanos, mas se por alguma razão a densidade da água na superfície se tornar maior do que a densidade no fundo ocorre uma instabilidade gravitacionalmente e a água da superfície afunda.

Nos polos a densidade das águas de superfície aumenta por esfriamento direto ou pela formação de gelo que extrai água pura e forma águas com maior salinidade e maior densidade. Nestas regiões a circulação de fundo se origina pelo afundamento das águas de superfície. Em latitudes baixas águas mais densas e salinas são produzidas pelo excesso de evaporação acoplados a ventos fortes.

Se os dados de temperatura e salinidade correspondentes a uma dada profundidade forem plotados em um gráfico de temperatura na ordenada e salinidade na abscissa, esses pontos ditribuir-se-ão sobre uma linha contínua e suave, denominada curva T-S. Cada ponto do diagrama T-S, que representa a combinação temperatura-salinidade a uma dada profundidade, corresponde a uma densidade. Em diferentes regiões oceânicas são obtidas formas muito diferentes de curvas T-S.

Na figura C.1 os diagramas à esquerda mostram a distribuição de temperatura (vermelho) e salinidade (azul) com a profundidade. Os diagramas à direita mostram os Diagramas-TS correspondentes (rosa). No gráfico do topo, observa-se a formação de camadas de água quente e salinas encontradas nas profundidades de 0 - 300 m sobre uma massa de água de água fria e mais doce encontrada nas profundidades de 300 - 600 m. Abaixo, ocorre a formação de três camadas (intrusão de uma água de baixa salinidade na profundidade de 300 - 600 m). Em ambos os gráfico, as linhas cheias mostram a situação antes da mistura e as linhas pontilhadas a mostram depois da mistura.



Fig. C.1: Exemplos de diagramas de temperatura-salinidade - Diagramas-TS

As variações diurnas de temperatura na terra tem uma amplitude de dezenas de graus Celsius. Contudo, nos oceanos a variação diurna é de cerca de alguns graus centígrados. Existem satélites com cobertura global capazes de determinar as variações sazonais da superfície do mar com precisão, sendo a sensibilidade dos sensores de temperatura da ordem de 0,1 graus Celsius. Com a ajuda destes satélites, gráficos globais são produzidas continuamente mostrando a distribuição de temperatura dos oceanos. Essas medições, no entanto, são apenas de superfície pois os satélites não podem fornecer diretamente valores térmicos do interior dos oceanos.

Medições precisas da temperatura nas águas profundas dos oceanos só foram possíveis a partir de meados do século passado, após a descoberta de termômetros protegidos contra as variações de pressão e reversíveis de forma a registrar as temperaturas *in situ*.

A energia solar incidente nos oceanos aquece diretamente suas águas e a maior parte desta energia é absorvida nos primeiros metros de profundidade. Por isso, a temperatura dos oceanos decresce com a profundidade. Como a propagação de valores térmicos por condução é bastante pequena, pouco calor é transferido verticalmente no processo de condução.

A turbulência é o mecanismo principal através das ondas de superfície e vento para que haja a condução turbulenta. Esses processo dão origem à camada de mistura de superfície que pode ter entre 200 a 300 metros de espessura em latitudes médias e apenas 10 metros em áreas rasas da plataforma continental. Nas latitudes médias a camada de mistura de superfície apresenta variações sazonais tanto de profundidade quanto de temperatura. No período de inverno, quando as temperaturas são baixas e há grande ação das ondas de superfície, ocorre o resfriamento da camada de mistura e ela se estende até a termoclina permanente. Seu perfil pode ser aproximadamente vertical nos 200 a 300 metros desde a superfície. Durante a primavera e o verão a camada de mistura absorve calor

Entre 200 a 300 metros até 1000 metros a temperatura diminui rapidamente dando origem ao que se chama termoclina permanente. Nesta zona a temperatura decresce gradualmente até atingir cerca de 0 a 3 graus Celsius. Esse range de temperatura é definido em todos os oceanos, independentemente das estações, pelas águas mais densas e frias que afundam junto as regiões polares e fluem no fundo dos oceanos em direção ao equador.

Termoclinas sazonais começam a se formar logo acima da termoclina permanente nos meses de primavera e atingem o seu máximo nos meses de verão, devido ao aumento da insolação. Elas tem a espessura de algumas dezenas de metros. À medida que o inverno vai chegando e há a ocorrência de ventos mais fortes, a profundidade da termoclina sazonal aumenta e a sua temperatura diminui, reduzindo gradativamente o gradiente de tal forma que a que a camada de mistura atinge profundidades de 200 a 300 metros. Em latitudes próximas ao Equador não ocorre o esfriamento durante o inverno de forma que a termoclina sazonal torna-se permanente e se confunde com a termoclina permanente a profundidades de 100 a 150 metros. Em latitudes maiores do que 60 graus não há termoclina permanente.

Termoclinas diurnas também ocorrem nos oceanos durante os dias de alta insolação a profundidades que não excedem 10 a 15 metros com diferenças de 2 a 3 graus de range de temperatura. As profundidades da camada de mistura e termoclina permanente são menores em altas latitude e nas menores latitudes do que nas latitudes médias porque os ventos são mais fracos e há menor contraste de valores térmicos sazonais.