

O Uso de Códigos Corretores de Erros em Comunicações Acústicas Submarinas

Maria Luiza Costa Vianna, João Pedro Kappes Marques e Marcello L. R. de Campos

Resumo—Este artigo apresenta um estudo sobre códigos corretores de erros e sua aplicação na transmissão acústica submarina. Compara códigos em blocos e códigos convolucionais para canal AWGN e também para um canal prático, cuja resposta ao impulso fora obtida em teste de mar perto da costa do Estado do Rio de Janeiro.

Palavras-Chave—Comunicações submarinas, comunicações acústicas, códigos corretores de erros.

Abstract—This article presents a study about error correcting codes and its application to underwater acoustic communication. The comparison was carried out for block and convolutional codes using AWGN channel and also for a practical channel whose impulse response was obtained off the coast of the State of Rio de Janeiro, Brazil.

Keywords—Underwater communications, acoustic communications, error correcting codes.

I. INTRODUÇÃO

O uso de comunicações acústicas no ambiente marinho vem se expandindo. Devemos isso ao crescimento da exploração econômica no oceano, ao monitoramento de impactos ambientais e também às atividades militares que acompanham esse movimento. Todas essas tarefas possuem um desafio comum: o fluxo de dados e informações no espaço submarino. Esse ambiente apresenta resistência aos métodos desenvolvidos para a telecomunicação eletromagnética, o que torna a alternativa acústica justificável. O grande número de interferências, entretanto, exige que tais sistemas possuam bons codificadores de mensagens. Nesse âmbito realizamos um estudo sobre códigos corretores de erros, com o apoio do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), a fim de auxiliar a definição dos parâmetros que nortearão o projeto do modem acústico submarino da Marinha Brasileira.

A elaboração da teoria dos códigos corretores de erros foi crucial para desenvolver o campo da transmissão de dados. Ao transmitir um dado, ocasionalmente ocorrem interferências que tornam a mensagem recebida diferente da enviada. A teoria propõe detectar e corrigir os erros. Na década de 1940, os primeiros computadores eram enormes e guardavam os programas em cartões perfurados, com grande probabilidade de erros. Entretanto havia apenas um sistema de detecção, ou seja, se um erro fosse detectado, a máquina parava de ler o programa e passava a ler o próximo. Richard W. Hamming, que trabalhava no laboratório Bell de tecnologia, se dispôs a desenvolver uma técnica para localizar a posição do erro e corrigi-lo por meio de redundâncias.

II. CÓDIGOS CONVOLUCIONAIS E CÓDIGOS DE BLOCOS

Se $[n,d]$ - código é um código de bloco, a variável d é a dimensão desse código, número de bits realmente informativos, e n é o comprimento que as mensagens passam a

ter após serem codificadas. Nesse caso, para a codificação é utilizada uma matriz geradora. Dizemos que esta está na forma *standart* quando os primeiros d bits da palavra-código são os significantes e os $n-d$ seguintes são os redundantes.

Uma forma de analisar a eficiência de um código linear é por meio de seu peso, afina, um código C , cujo peso é $W(C)$, é capaz de corrigir $e = \lfloor \frac{w(C)-1}{2} \rfloor$ erros, sendo $W(C) = \min\{d(x,y) \mid x,y \in C, x \neq y\}$. d é a distância de Hamming entre x e y , com $x,y \in C$ por exemplo, isso equivale ao número de coordenadas em que elas diferem.

Os Códigos Convolucionais fazem parte de outra técnica de codificação e são bem diferentes dos Códigos de Bloco. A informação não se encontra localizada em um bloco de bits da palavra-código, mas sim "embaralhada" por toda sua extensão. Cada bit informativo é convoluído com um coeficiente gerador. Uma grande vantagem dos Códigos Convolucionais é sua fácil implementação no codificador. Entretanto, esses códigos apresentam maior complexidade no processo de decodificação e dessa forma são utilizados em casos onde necessita-se de uma codificação mais robusta, como por exemplo em comunicações via satélites.

Podemos descrever esses códigos através de três parâmetros, sendo eles a taxa de codificação, o tamanho de confinamento e o tamanho de memória do codificador. O primeiro é a relação entre o número de bits do decodificador e o número de símbolos de canais da saída do codificador. O segundo, corresponde ao comprimento do codificador convolucional, ou seja, quantos estágios são necessários para completar a lógica combinacional que produz os símbolos de saída. Por fim, o terceiro indica quantos ciclos do codificador um bit de entrada é usado para a codificação de demais símbolos após sua entrada no codificador.

A decodificação dos códigos convolucionais pode ser feita por meio do algoritmo de Viterbi, que decodifica os símbolos de entrada produzindo saídas binárias. Se digitalizarmos a sequência de bits antes de decodificá-la (transformar as entradas em bits 0 e 1) o processo é chamado de *decodificação por decisão hard*. Quando decodificamos o vetor de entradas diretamente, sem processá-lo, chamamos de *decodificação por decisão soft*. O Algoritmo de Viterbi pode ser utilizados de ambas as formas.

III. ANÁLISE TEÓRICA DE CÓDIGOS

A seguir, iremos mostrar os resultados do estudo comparativo de alguns códigos de bloco e um código convolucional utilizando um gráfico BER (*bit error rate*) cujo eixo das ordenadas é equivalente à probabilidade de ocorrência de erros para um código, enquanto o eixo das abscissas refere-se ao quociente, em decibéis, entre a energia do sinal e a energia do ruído aditivo do canal (E_b/N_0). Os códigos analisados foram escolhidos pela sua importância histórica e por serem utilizados comercialmente.

M. L. C. Vianna, J. P. K. Marques e M. L. R. de Campos, Departamento de Engenharia Eletrônica e de Computação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil. Emails: {marialuizacvianna}, {jpkappesm}@poli.ufrj.br, campos@smt.ufrj.br.

a) *Hamming(7,4,3)*

Um dos primeiros códigos, o Hamming(7,4,3), foi criado por Richard W. Hamming por volta de 1947 e tem como objetivo corrigir um *bit* por mensagem transmitindo 4 *bits* de informação e 3 de redundância. Sua taxa de informação é $i = 4/7 \simeq 0.571428$ e seu peso é $W(C) = 3$.

b) *Golay(24,12,8)*

O Golay(23,12,7) foi publicado em 1949 por Marcel J. E. Golay e corresponde a um código linear com capacidade de corrigir 3 *bits*. Já a sua expansão, o (24,12,8), foi utilizado pela NASA nas missões Voyager 1 e 2 para a transmissão de fotos coloridas de Júpiter e de Saturno em 1979, 1980 e 1981. O G_{24} é muitas vezes citado como código de Golay. Sua taxa de informação é $i = \frac{12}{24} = 0.5000$ e seu peso é $W(C) = 8$.

c) *Reed-Muller(1,5) / Hadamard(32,6,16)*

O código de Hadamard(32,6,16), que também pode ser gerado por meio do $R.M.(1,5)$, foi utilizado em 1971 pela NASA na missão Mariner 9 para corrigir erros na transmissão de fotos em preto e branco. Sua taxa de informação é $i = \frac{6}{32} \simeq 0.1875$ e seu peso é $W(C) = 16$.

d) *Industry Standard Code*

Um dos códigos convolucionais mais utilizados, atualmente implementado na codificação e decodificação de chips por vários fabricantes. Sua taxa de informação é $i = \frac{1}{2} \simeq 0.5$.

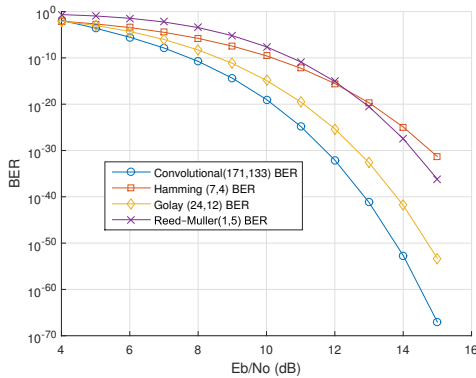


Fig. 1. Comparação do desempenho dos códigos para canal AWGN.

Para construir o gráfico comparativo da Fig. 1, utilizamos a função `bercoding` do MATLAB com modulação 16-FSK, utilizada por diversos modems acústicos comerciais e também nos protótipos desenvolvidos pela Marinha Brasileira. A princípio, consideramos um canal apenas com ruído aditivo gaussiano. Na prática, o canal acústico submarino é bastante ruidoso e por isso buscamos um código que apresente baixos valores de BER para baixos valores de E_b/N_0 . Pudemos inferir que o código convolucional apresenta performance superior as dos demais em comparação. Além disso, apresenta uma taxa de informação boa em relação aos outros códigos e facilidade no processo de codificação da mensagem.

IV. SIMULAÇÃO BASEADA NO CENÁRIO ACÚSTICO DA REGIÃO DOS LAGOS

A partir da análise teórica da BER em um canal AWGN, decidimos testar o código convolucional Industry Standard Code (171,133)_{octal} com a taxa $R = \frac{1}{2}$ no canal acústico submarino. Para tal, contamos com a ajuda da Marinha do Brasil para obtenção dos dados referentes a transmissão e recepção de mensagens. No dia 11/05/2015, nas proximidades da Ilha do Cabo Frio, dois navios separados por aproximadamente 1

km se comunicaram a partir de ondas acústicas utilizando a modulação 16-FSK com frequência central de 7.5kHz, largura de banda de 5kHz, janelamento do sinal por Hann, frequência de amostragem 48kHz, portadoras ortogonais entre si e mensagens codificadas com o código convolucional estudado. A resposta ao impulso foi obtida a partir de um dos chirps de um sinal recebido à 13:10:57 horas cujo E_b/N_0 foi de 46,37dB. Com a resposta ao impulso, transmissões foram simuladas com as mesmas características e com o E_b/N_0 assumindo os seguintes valores $E_b/N_0 = 10.3307, 8.3545, 6.3967, e 4.5526$, em decibéis. Nas simulações, decodificamos as mensagens por meio do algoritmo de Viterbi nos modos *soft* e *hard* para assim obter o gráfico de $BER \times E_b/N_0$. Na Fig. 2 podemos ver o gráfico obtido:

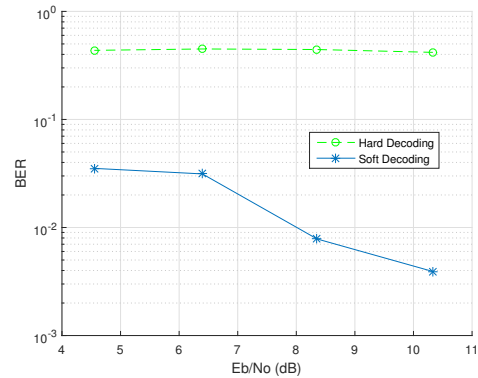


Fig. 2. BER relacionada ao algoritmo de Viterbi nos modos *soft* e *hard* para o canal acústico submarino.

A presença de multipercurso no canal real pode ser inferida pelo baixo desempenho do sistema, como mostrado na Fig. 2, bem abaixo do desempenho teórico esperado para o canal AWGN, mostrado previamente no gráfico da Fig. 1. Isso indica a necessidade de equalização do canal, que no entanto foge ao escopo do estudo apresentado aqui. O gráfico também mostra o desempenho bastante superior da decodificação soft Viterbi quando comparada com a decodificação hard.

V. CONCLUSÕES

O código convolucional analisado se mostrou mais eficiente comparado com os códigos de bloco mencionados. De forma esperada, os gráficos relativos a BER no canal teórico AWGN e no canal obtido do experiente prático ficaram diferentes. Devemos isso ao fato de o canal submarino ser seletivo em frequência e requerer equalização. Embora seja computacionalmente mais complexa, a decodificação pelo algoritmo soft Viterbi deve ser encorajada no protótipo da MB, dado seu desempenho superior àquele obtido com a decodificação hard.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado por CNPq, CAPES (Projetos Jovens Talentos e PRODEFESA 23038.009094/2013-83) e FINEP (Projeto Comunicações Submarinas FINEP-01.13.0421.00).

REFERÊNCIAS

- [1] VOLOCH, José Felipe. Códigos corretores de erros. Rio de Janeiro: Impa, 1987.
- [2] MACWILLIAMS, F. J.; SLOANE, N. J. A.. The Theory of Error-Correcting Codes. Amsterdam: North-holland Mathematical Library, 1977.
- [3] HEFEZ, Abramo; VILLELA, Maria Lúcia T. Códigos Corretores de Erros. Rio de Janeiro: IMPA, 2002.
- [4] MILIES, César Polcino. Breve Introdução à Teoria dos Códigos Corretores de Erros. São Paulo: Departamento de Matemática UFMS, 2009.