

Modelagem de Padrões de Erros da Camada Física de Sistemas de Comunicações HF Ionosféricas usando HMM

Elaine Crespo Marques, Nilson Maciel de Paiva Junior, Francisco Carlos Ribeiro Junior e Juraci Ferreira Galdino

Resumo—As transmissões ionosféricas na faixa de HF são estratégicas para um país de dimensão continental como o Brasil e que possui amplas regiões com carência ou até mesmo inexistência de infraestrutura de comunicações. A fim de padronizar essas comunicações, foram desenvolvidas diversas normas. Dentre elas, destaca-se a norma militar MIL-STD-188-110C, que é amplamente utilizada. Devido às características do canal ionosférico, geralmente ocorrem erros em surtos nos receptores, sendo de grande interesse modelá-los para fins de avaliação de desempenho de protocolos de comunicações, particularmente os das camadas de enlace e de transporte do modelo de referência OSI. Neste trabalho, empregam-se modelos de Markov escondidos (HMM), cujos parâmetros são ajustados com o algoritmo Baum-Welch (BW), para modelar os referidos padrões de erros. Resultados de simulação mostram que é possível obter modelos HMM que representam bem um cenário da camada física previsto na norma MIL-STD-188-110C.

Palavras-Chave—HMM, Baum-Welch, MIL-STD 188-110C, HF, Erros em Surtos.

Abstract—Data transmission over ionospheric HF channels are strategic for a continental-sized country as Brazil, which comprises large areas lacking communications infrastructure. In order to standardize these communications, various standards were developed, amongst them the military standard MIL-STD-188-110C. Due to inherent characteristics of ionospheric channels, burst errors may take place in the receptor. It is of great interest to model such errors for the purpose of evaluating communications protocols performance, particularly those belonging to link and transport layers of the OSI reference model. In this work, we employ hidden Markov models (HMM), whose parameters are calculated by the Baum-Welch algorithm (BW), to model such error patterns. Simulation results show that it is possible to obtain HMM models that represent a given scenario of a physical layer based on the MIL-STD-188-110C standard.

Keywords—HMM, Baum-Welch, MIL-STD 188-110C, HF, Burst Errors.

I. INTRODUÇÃO

A transmissão de dados via propagação ionosférica em *High Frequency* (HF) é estratégica para o Brasil. Apesar do pouco apelo comercial, em razão das baixas velocidades de transmissão, os mecanismos de propagação através das camadas ionosféricas permitem o estabelecimento de comunicações a longa distância sem a necessidade de infraestrutura, como as comunicações satelitais e as tecnologias de comunicações sem fio tais como WiMax, WiFi e Comunicações Celulares Móveis. Tais características são importantes para o Brasil,

país de dimensões continentais e de grandes anecúmenos com carência de infraestrutura de comunicações. Diante disso, o Brasil, por intermédio do Exército Brasileiro, mantém uma rede de cobertura nacional de contenção baseada em enlaces ionosféricos na faixa de HF.

No entanto, a ionosfera provoca severos distúrbios nas ondas eletromagnéticas que nela se propagam. Um dos mais prejudiciais é o surgimento do fenômeno de múltipercursos, resultando em réplicas distorcidas do sinal transmitido capturadas nos receptores digitais. Há também o fenômeno de espalhamento Doppler [1], que cria componentes de frequências inexistentes no sinal transmitido. Assim sendo, as respostas ao impulso em tempo discreto de tais canais são comumente modeladas por filtros lineares variantes no tempo e seletivos em frequência. Além disso, esse ambiente de propagação é caracterizado pelos efeitos de dutos e de diversas fontes ruidosas, brancas e coloridas.

Uma das consequências dos efeitos provocados pelo canal de HF ionosférico e das técnicas comumente empregadas nas estratégias de recepção (camada física do modelo de referência OSI - *Open Systems Interconnection*) para combatê-los é a concentração de erros de bit na saída de demoduladores e de decodificadores (erros em surtos) [2]. Cabe destacar que esse fenômeno, surtos de erros de bit, também ocorre com frequência em outros sistemas de comunicações em canais sem fio como, por exemplo, nos sistemas de comunicações satelitais [3], [4].

Os erros produzidos na camada física afetam o desempenho dos protocolos de comunicações empregados, particularmente, nas camadas de enlace e de transporte [5], [6]. Deve-se destacar que tais efeitos dependem não apenas da taxa de erros (BER - *Bit Error Ratio*) mas, principalmente, do modelo de correlação dos erros ao longo do tempo [7].

Diante do supracitado, há um grande interesse no desenvolvimento de ferramentas voltadas à análise e à modelagem dos padrões de erros [2], [8] da camada física, bem como na utilização desses modelos na avaliação de desempenho de protocolos de comunicações [5], [6], [7]. A modelagem dos padrões de erros na saída de demoduladores é importante para a realização de pesquisa, projeto e avaliação de desempenho de estratégias de codificação de canal a serem adotadas na própria camada física. Por sua vez, a modelagem na saída da camada física (saída de decodificadores de canal) é importante para realizar a avaliação de desempenho, a pesquisa e o desenvolvimento de protocolos de comunicações a serem empregados nas camadas de enlace, de rede e de transporte,

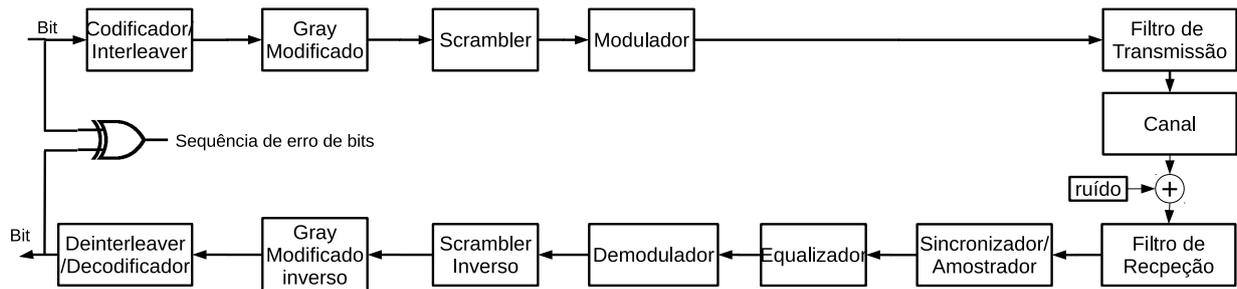


Fig. 1. Diagrama do Transceptor da MIL-STD-188-110C.

além de auxiliar no estudo de estratégias de *crosslayer* [9].

Uma das formas de se investigar o impacto dos erros em surtos nos protocolos de comunicação é por meio do desenvolvimento de modelos matemáticos que reproduzam, ao menos sob o ponto de vista estatístico, os padrões de erros de bits na saída dos receptores (camada física), verificados seja em condições reais de operação seja através de simulações de Monte Carlo dos enlaces de comunicação. Uma ferramenta matemática comumente empregada para representar processos com memória, como os erros em surtos, são os modelos de Markov escondidos (*Hidden Markov Model* - HMM). Neles, assume-se que a sequência de observação pode ser modelada por um processo de Markov, ou seja, que a amostra da observação atual depende exclusivamente do estado no qual a cadeia de Markov se encontra no momento, e que este estado atual depende apenas do estado imediatamente anterior, não sendo necessária a informação de todo o passado do processo [4], [5], [7]. O método mais empregado para a estimação dos parâmetros de modelos HMM é o algoritmo Baum-Welch (BW), cuja base é o algoritmo de *Expectation-Maximization* (EM) [10].

Alguns autores argumentam que a escolha do número de estados do modelo HMM pode ser dependente das condições físicas do canal, dos esquemas de modulação utilizados, das condições de entrada do sistema, por exemplo [11].

Vários trabalhos de modelagem com HMM voltados para a área de comunicações digitais consideram apenas o canal de transmissão ou sistemas de comunicações simples [11], [12]. Segundo o conhecimento dos autores, poucos trabalhos modelam erros em surtos de camadas físicas de sistemas de comunicações mais complexos [13]. Mais especificamente, não foram encontrados trabalhos abordando a modelagem de sistemas operando em canais HF ionosféricos. Estes canais, além de úteis em uma variedade de aplicações, tem seu desempenho fortemente prejudicado pela ocorrência de erros em surtos.

Neste trabalho, emprega-se o HMM para modelar a camada física de sistemas de comunicações HF ionosféricos desenvolvida com base na norma MIL-STD-188-110C, que é a mais importante e difundida norma para esse tipo de transmissão. Para tal, foi gerada uma sequência de erros obtida através da transmissão e recepção do sistema de comunicação completo [14], utilizando a técnica de simulação de Monte Carlo. Os ajustes dos modelos HMM investigados foram obtidos por meio do algoritmo Baum-Welch. A partir dos

modelos HMM obtidos, foram geradas sequências de erros e realizadas comparações de seus parâmetros estatísticos com os da sequência de erros gerada pelo sistema de comunicação.

O restante deste artigo é organizado da seguinte forma. Na Seção II é apresentada a estrutura básica do sistema de comunicação investigado (transceptor MIL-STD-188-110C). Na Seção III são introduzidos alguns conceitos e definições dos parâmetros estatísticos usualmente adotados para caracterizar os erros em surtos, bem como discutidos os parâmetros dos modelos HMM e apresentado sucintamente o algoritmo Baum-Welch. Os resultados são mostrados e analisados na Seção IV. Por fim, na Seção V, são apresentadas as conclusões e as propostas de trabalhos futuros.

II. SISTEMA DE COMUNICAÇÃO IMPLEMENTADO

O sistema de comunicação de interesse deste trabalho foi implementado de acordo com a parte mandatória da norma MIL-STD-188-110C. Essa norma apresenta requisitos mínimos de desempenho (sob diversas condições de operação) e padrões técnicos necessários para garantir a interoperabilidade de transceptores militares operando na faixa de HF [15]. Em sua parte principal (mandatória), ela estabelece a estrutura de quadros e as técnicas de banda base a serem adotadas no transmissor em função da velocidade de transmissão da camada física, que deve ser escolhida dentre um dos seguintes valores: 75bps, 150bps, 300bps, 600bps, 1200bps, 2400bps e 4800bps. Em particular, um quadro é composto de preâmbulo e de sucessivos blocos de dados (*payload*) intercalados por blocos contendo sequências de treinamento (*miniprobes*), e possui tamanho, expresso em segundos, de 0,6 ou 4,8 segundos, de acordo com o tipo de *interleaver* empregado (curto ou longo, respectivamente).

A Figura 1 apresenta o diagrama de blocos simplificado do transceptor implementado conforme a norma MIL-STD-188-110C. No lado da transmissão, a norma apresenta em detalhes as técnicas a serem empregadas nos seguintes componentes: codificador de canal (código convolucional), *interleaver*, mapeamento *Gray* modificado, *scrambler* e modulador.

A norma estabelece o uso de filtros de transmissão e de recepção casados do tipo raiz quadrada de cosseno levantado, com fator de *roll-off* igual a 0,35 e a largura de banda em RF de 3 kHz.

No lado da recepção, o preâmbulo é empregado para realizar identificação da taxa de transmissão, sincronização de início de quadro e de símbolo e ajuste dos parâmetros do equalizador.

O rastreamento dos parâmetros do equalizador e o ajuste fino de sincronização de símbolos podem ser realizados com a ajuda das sequências contidas nos *miniprobos*.

Durante a transmissão, o sinal está sujeito aos efeitos inerentes à comunicação na faixa de HF, como dispersões no domínio do tempo e da frequência, ocasionados pelas reflexões ionosféricas. O modelo mais utilizado para simulação de canais de HF foi proposto por Watterson em [16] e consiste em um filtro transversal com 2 componentes principais (raios) de mesma potência média e espalhamento espectral gaussiano. O sinal é ainda contaminado por ruído branco gaussiano aditivo (AWGN - *Additive White Gaussian Noise*). Cabe destacar que os canais de HF ionosféricos evoluem lentamente com o tempo, de tal maneira que situações severas de desvanecimento prejudicam a detecção de muitos símbolos contíguos, propiciando assim, a tendência ao surgimento de longos surtos de erros.

No receptor, alguns componentes (Demodulador, *Scrambler* inverso, Gray modificado inverso e Deinterleaver) realizam processamentos inversos aos respectivos componentes de transmissão que são especificados pela norma. Porém, o Sincronizador e o Equalizador, que visam especificamente a combater os distúrbios do canal, não são especificados. Neste trabalho utilizou-se o (*Decision-Feedback Equalizer* - DFE), uma técnica de equalização amplamente empregada por proporcionar uma boa solução de compromisso entre complexidade e desempenho em aplicações que envolvem intensos cenários de desvanecimento nos domínios do tempo e da frequência, como é o caso dos canais de HF ionosféricos [17]. Com relação ao sincronismo foi utilizado um correlator para detectar o início do quadro.

III. MODELAGEM DE ERROS DA CAMADA FÍSICA

Esta seção descreve as principais estatísticas dos erros em surtos, as características de um modelo de Markov escondido e o algoritmo utilizado para a obtenção de seus parâmetros.

A. Erros em Surtos na Camada Física

Uma sequência de erros na saída da camada física é aqui representada por uma sequência binária, onde o “1” denota a posição da ocorrência de um erro e o “0” indica a posição de um dígito binário detectado corretamente pela camada física. Um *error cluster* (EC) é uma sequência de bits errados consecutivos cujo comprimento é dado pelo número de 1’s [18]. Um *gap* (G) é definido como uma sequência de bits corretos, “0”, entre dois bits errados, “1”, tendo comprimento igual ao número de 0’s [3]. Um *Intervalo entre Surtos* (EFB) é definido como uma sequência de 0’s com comprimento maior ou igual a η bits, onde η é um inteiro positivo [19]. Um *Surto de Erros* (EB) é a sequência de “0” e “1” que começa e termina com um “1”, e é limitada por dois *intervalo entre surtos* [19], [20]. A Figura 2 ilustra essas definições para uma sequência particular.

Três estatísticas amplamente adotadas para caracterização dos erros em surtos são apresentadas abaixo:

- $G(m_g)$: função densidade de probabilidade do comprimento de *gaps* [3];
- $C(m_c)$: função densidade de probabilidade do comprimento de *error cluster* [3];

- Função autocorrelação dos erros.

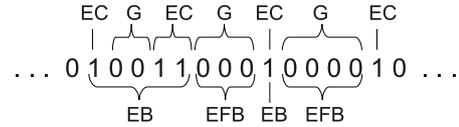


Fig. 2. Exemplo de uma sequência de erros em surtos para $\eta = 3$.

B. Modelo de Markov Escondido (HMM)

O processo em que cada observação corresponde a um determinado estado é denominado Modelo de Markov observável. Este modelo, contudo, é restritivo e pouco aplicável em problemas reais. A fim de torná-lo mais flexível, uma função de distribuição de probabilidade de observações é associada a cada estado. Assim, cada um gera uma observação de acordo com a sua respectiva distribuição. Dessa maneira, a mesma sequência de observações pode ser gerada a partir de diferentes probabilidades de diferentes sequências de estados. Como a sequência de estados finita que gera a sequência de observações não é conhecida, esta variante recebe então o nome de modelo de Markov escondido (HMM). Diferentemente do anterior, este modelo é usado para resolver uma variedade de problemas.

Um modelo HMM é caracterizado pelo número de estados e pelas distribuições de probabilidades condicionais de transição de estados e das observações, dados os estados. Admitindo-se que essas observações assumem valores em um conjunto discreto e finito, tem-se os seguintes parâmetros:

- N - Número de estados da cadeia de Markov;
- m - Número de símbolos do alfabeto de observações;
- $A = \{a_{i,j}\}$ - Matriz das probabilidades de transições de estados. As probabilidades de transição são $a_{i,j} = p(q_{t+1} = j | q_t = i)$, onde q_t representa o estado no índice de tempo t . As seguintes condições devem ser atendidas: $0 \leq a_{i,j} \leq 1$, $\sum_{j=1}^N a_{i,j} = 1$ e $1 \leq i, j \leq N$
- $B = \{b_j(k)\}$ - Matriz das distribuições condicionais de probabilidades das observações dados os estados. As probabilidades são $b_j = p(o_t = v_k | q_t = j)$, onde v_k representa o k -ésimo símbolo de observação no alfabeto e o_t corresponde à observação no índice de tempo t , devendo satisfazer às seguintes condições: $0 \leq b_j(k) \leq 1$, $\sum_{k=1}^m b_j(k) = 1$, $0 \leq j \leq N$ e $1 \leq k \leq m$.
- $\Pi = \{\Pi_i\}$ - Vetor das probabilidades de inicialização em cada estado. As probabilidades $\Pi_i = p(q_1 = i)$ devem obedecer às seguintes condições: $0 \leq \Pi_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^N \Pi_i = 1$ e $1 \leq i \leq N$.

Neste trabalho, denota-se um modelo HMM escondido, a partir de seus parâmetros, por $\lambda = (A, B, \Pi)$, os quais serão aqui estimados usando o algoritmo Baum-Welch [10].

C. Algoritmo Baum-Welch (BW)

O algoritmo BW é um caso particular do conhecido algoritmo EM para a estimação de máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood* - ML) e pode ser descrito pelos seguintes passos:

Passo 0: Inicializar a estimativa de parâmetros $\hat{\lambda} = \{\hat{A}, \hat{B}, \hat{\Pi}\}$.

Passo 1: Calcular as seguintes variáveis progressivas e regressivas, utilizando $\hat{\lambda}$.

$$\alpha_t(i) = P[O_1, O_2, \dots, O_t, s_t = i | \hat{\lambda}] \quad (1)$$

$$\beta_t(i) = P[O_{t+1}, O_{t+2}, \dots, O_T | s_t = i, \hat{\lambda}] \quad (2)$$

Passo 2: Atualizar $\hat{\lambda}$, usando $\alpha_t(i)$ e $\beta_t(i)$ obtidos no Passo 1. As expressões para esta atualização podem ser obtidas em [10].

Passo 3: Verificar a condição de parada. Se esta não for atendida, retornar para o Passo 1 com a atualização de $\hat{\lambda}$.

Existem diversos critérios de parada como, por exemplo, o número máximo de iterações ou então a diferença dos valores de verossimilhança entre duas iterações consecutivas.

O algoritmo BW possui garantia de convergência para um ponto de máximo, que pode ser local ou global, dependendo de sua inicialização. Para tentar reduzir a dependência com a inicialização, algumas técnicas heurísticas são por vezes utilizadas.

Neste trabalho, adotaram-se diversas inicializações do algoritmo para minimizar os efeitos das possíveis soluções serem limitadas por máximos locais. A quantidade de estados também é fator que pode limitar o ajuste do modelo. Dessa forma variou-se a quantidade de estados do modelo HMM.

IV. RESULTADOS

Implementou-se a camada física de um enlace HF ionosférico de acordo com a parte mandatória da MIL-STD-188-110C. Utilizou-se o modelo de Watterson para resposta ao impulso do canal de HF, simulando por meio do método de Monte-Carlo [21]. Foram considerados nessa simulação um atraso de 2ms entre os raios da resposta ao impulso do canal e um espalhamento Doppler de 1Hz para modelar a evolução temporal de cada raio (esse canal é classificado como Ruim, de acordo com as especificações da norma MIL-STD-188-110C). Empregou-se um DFE com 17 coeficientes no filtro avanço e 5 coeficientes do filtro de realimentação, os quais foram ajustados e usando o algoritmo de filtragem adaptativa *Inverse QR-RLS*, conforme [14].

No experimento, adotou-se taxa de transmissão de 2400 bps e um valor da razão sinal-ruído (*Signal to Noise Ratio* - SNR) igual a 18dB (a SNR é expressa em termos da razão entre a energia do símbolo e a Densidade Espectral de Potência do ruído). Esse valor de SNR é utilizado como referência na MIL-STD-188-110C para fins de avaliação de desempenho da camada física operando com uma velocidade de 2400bps.

Simulou-se uma transmissão de 10 blocos de *interleaver* longo, o que equivale a 48 segundos de transmissão (115.140 bits de dados transmitidos). A sequência de bits obtida na saída do receptor foi comparada com a sequência de bits transmitida, dando assim origem à sequência de erros alvo.

Para ajustar o modelo HMM à sequência alvo, utilizou-se o algoritmo Baum-Welch apresentado sucintamente na seção III-C. Foram obtidos 600 modelos HMM, sendo 200 com 2 estados (também conhecido como modelo de Gilbert-Elliot [22]), 200 com 3 estados e 200 com 4 estados. Adotou-se, como critério de parada do algoritmo BW, o valor de 10^{-8}

para a norma da diferença entre matrizes do modelo HMM (matrizes A e B) obtidas em iterações consecutivas.

A partir de cada modelo HMM obtido, foram geradas 100 sequências de 115.140 bits, totalizando 60.000 sequências. Para cada uma delas, foram calculados os seguintes parâmetros estatísticos: autocorrelação, distribuição de *gaps* e distribuição de *clusters*. Calculou-se então o erro quadrático entre as três estatísticas de cada sequência e as estatísticas da sequência alvo. A partir desses erros, foram selecionados os três modelos mais bem ajustados a cada estatística considerada individualmente, sem restrições quanto à ordem dos modelos. As referências “*alvo*”, “*melhor_ac*”, “*melhor_dc*” e “*melhor_dg*” utilizadas a seguir representam, respectivamente, a sequência alvo e as sequências geradas pelos modelos que obtiveram o menor erro quadrático em relação à autocorrelação, à distribuição de *clusters* e à distribuição de *gaps*.

A Tabela I apresenta os valores de verossimilhança (logaritmo de probabilidade) e os erros quadráticos em relação às estatísticas das sequências obtidas pelos 3 modelos selecionados.

TABELA I

ERRO QUADRÁTICO DOS MODELOS.

Modelo	verossimilhança	autocorrelação	$C(m_c)$	$G(m_g)$
“ <i>melhor_ac</i> ”	-5200.20052	0.51087	0.03387	0.05395
“ <i>melhor_dc</i> ”	-5200.16692	0.55481	0.01652	0.06160
“ <i>melhor_dg</i> ”	-5172.16044	0.56774	0.02797	0.02525

O modelo que obteve menor erro quadrático em relação à distribuição de *clusters* (“*melhor_dc*”) possui 2 estados. Em contrapartida, os modelos que obtiveram os menores valores de erros quadráticos com relação à autocorrelação (“*melhor_ac*”) e à distribuição de *gaps* (“*melhor_dg*”) foram modelos HMM de 4 estados.

A Tabela I revela algumas particularidades interessantes. Em primeiro lugar, nenhum modelo é capaz de produzir os menores valores de erro quadrático para todas as estatísticas. Assim sendo, é importante determinar qual a estatística mais importante para a aplicação em questão, para definir a estratégia de ajuste do modelo HMM. Em segundo lugar, a estatística de ajuste mais crítico é a distribuição de *gaps* (“*melhor_dg*”), uma vez que o modelo ajustando com base em outra estatística (distribuição de *clusters* e autocorrelação) produz, relativamente, um maior valor de erro quadrático em relação ao valor de erro quadrático obtido pelo modelo ajustado de acordo com a distribuição de *gaps* (“*melhor_dg*”). Assim, sendo, caso não seja evidente qual a estatística mais importante para a aplicação, os resultados aqui obtidos indicam que o modelo HMM ajustado de acordo com a distribuição de *gaps* (“*melhor_dg*”) é aquele que obtém a melhor solução de compromisso para as três estatísticas consideradas.

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam, respectivamente, as estatísticas de autocorrelação, distribuição de *gaps* e distribuição de *clusters* produzidos pelos três modelos escolhidos e também pela sequência alvo. Os gráficos confirmam a possibilidade de uso do algoritmo Baum-Welch na obtenção de modelos HMM que aproximam o sistema desejado, ao menos, nas estatísticas em questão. Além disso, conforme esperado, o modelo HMM escolhido usando a distribuição de *gaps* aparentemente oferece

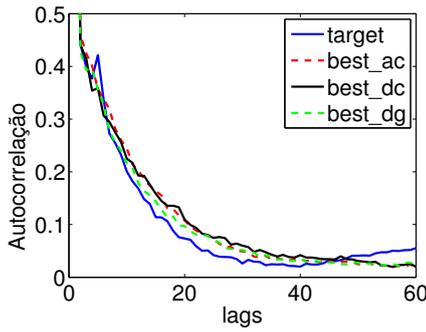


Fig. 3. Função autocorrelação.

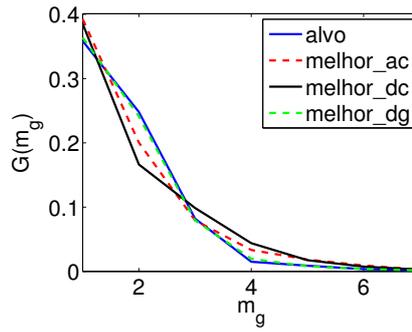


Fig. 4. Distribuição de gaps.

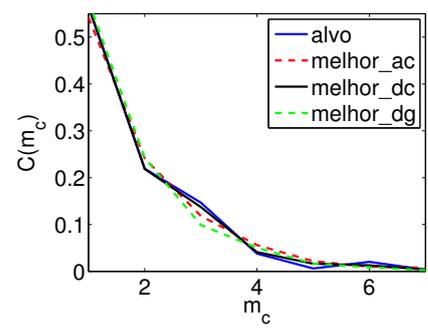


Fig. 5. Distribuição de cluster.

boa aproximação nas três estatísticas em conjunto.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, empregou-se a modelagem HMM para representar os padrões de erros da camada física de um enlace de comunicação HF ionosférico implementada de acordo com a norma MIL-STD-188-110C. Utilizou-se o algoritmo Baum-Welch para ajustar os parâmetros dos modelos e, apesar das conhecidas limitações desse algoritmo, foi possível encontrar modelos com poucas ordens com estatísticas bem ajustadas às estatísticas das sequências utilizadas para realizar o treinamento dos modelos HMM considerados.

Apesar dos bons ajustes obtidos pela modelagem dos padrões de erros usando HMM, os resultados aqui obtidos mostram que a escolha da estatística de interesse para fins de ajuste do modelo interfere na escolha da ordem do modelo, bem como na estimativa dos parâmetros do modelo. Para a aplicação em questão, verificou-se que a distribuição de *gaps* (“*melhor_dg*”) é a estatística de ajuste mais crítica.

Na continuação deste trabalho, pretende-se realizar o ajuste do modelo HMM considerando conjuntamente todas as estatísticas aqui investigadas. Também pretende-se obter modelos para diversos cenários de comunicação previstos na norma MIL-STD-188-110C (diferentes taxas de transmissão, diversas configurações de características do canal de comunicação e valores de razão sinal-ruído, por exemplo).

Por fim, pretende-se realizar a avaliação de desempenho de protocolos da camada de enlace e da camada de transporte (TCP) utilizando ferramentas computacionais, tal como o Network Simulator (NS-2) [23], considerando os modelos HMM obtidos na modelagem dos padrões de erros da camada física.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer ao Exército Brasileiro pelo fomento ao Projeto RDS-Defesa; à FINEP, por meio do Convênio Programa Nacional RDS, e à FAPERJ, por meio do Programa Jovem Cientista do Nosso Estado (Processo:E26/103.013/2012).

REFERÊNCIAS

- [1] Eric E. JOHNSON. Advanced high-frequency radio communications. Artech House, 1997.
- [2] C. X. Wang and Wen Xu. A new class of generative models for burst-error characterization in digital wireless channels. *IEEE Transactions on Communications*, 55:453–462, March 2007.
- [3] S. Tsai. Markov characterization of the hf channel. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 17(1):24–32, 1969.
- [4] O.S. Salih, C.-X. Wang, and D.I. Laurenson. Three layered hidden markov models for binary digital wireless channels. In *IEEE International Conference on Communications, 2009. ICC '09.*, pages 1–5, 2009.
- [5] Heissler, R. Jeffrey, Barsoum, A. Yosry, and Richard Condello. An analysis of the viterbi decoder error statistics for atm and tcp/ip over satellite communication. 1999.
- [6] M. B. T. DANTAS, J. F. GALDINO, and E. L. PINTO. Tcp performance improvement over hf channels by lower-layer parameter tuning. *Revista Telecomunicações*, 13:70–78, 2011.
- [7] Michele ZORZI, A. Chockalingam, and Ramesh R. Rao. Throughput analysis of tcp on channels with memory. 18(7):1289–1300, July 2000.
- [8] M. Zorzi and R.R. Rao. Perspectives on the impact of error statistics on protocols for wireless networks. *IEEE Personal Communications*, 6(5):32–40, oct 1999.
- [9] David C. Moura, R. M Salles, and J. F. GALDINO. Multimedia traffic robustness and performance evaluation on a cross-layer design for tactical wireless networks. *Proceedings of the 9th International Information and Telecommunication*, pages 1–8, 2010.
- [10] J. Bilmes. A gentle tutorial on the em algorithm including gaussian mixtures and baum-welch. In *ICSI Technical Report TR-97-021*, 1997.
- [11] I.A. Akbar and W.H. Tranter. Order estimation of binary hidden Markov wireless channel models in Rayleigh fading. In *SoutheastCon, 2007. Proceedings. IEEE*, pages 202–207, March 2007.
- [12] Marcus V. S. Fernandes, Ernesto L. Pinto, and Marco Grivet. A novel structured markovian model for burst-error channels. *Sixth International Conference on Wireless and Mobile Communications*, 2010.
- [13] Rakesh Ranjan and Debjani Mitra. Performance of hmm based burst error modeling for cdma and ofdm transmissions. *Journal of Wireless Networking and Communications*, 3(5):63–73, 2013.
- [14] F. C. Ribeiro Junior, E. Crespo Marques, N. M. Paiva Junior, and J. F. Galdino. Avaliação de desempenho de equalizadores dfe adaptativos em enlaces hf ionosféricos que empregam a norma mil-std-188-110c. *Cadernos CPQD Tecnologia*, 10:101–112, 2014.
- [15] DEPARTMENT OF DEFENSE INTERFACE STANDARD. Interoperability and performance standards for data modems: Mil-std-188-110c. 2011.
- [16] C. C. et al. WATTERSON. Experimental confirmation of hf channel model. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 18(6):792–803, 1970.
- [17] J. Proakis. Digital communications. McGraw Hill, 5 ed., 2007.
- [18] B. D. Fritchman. A binary channel characterization using partitioned markov chains. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 13(2):221–227, April 1967.
- [19] J. Garcia-Frias and P.M. Crespo. Hidden markov models for burst error characterization in indoor radio channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 46(4):1006–1020, nov 1997.
- [20] *Blue book. Terms and definitions.*, volume 1.
- [21] A. G. GUIMARÃES, E. L. PINTO, J. F. GALDINO, and C. J. SILVA. Comparação de desempenho de simuladores de canais com desvanecimento rápido - parte i - avaliação numérica. *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, pages 426–430, 1997.
- [22] E. O. Elliott. Estimates of error rates for codes on burst-noise channels. *Bell-System Tech J.*, page 1977–1997, 1963.
- [23] The LBNL Network Simulator. “ns-2”. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.