

Estimação de Parâmetros de Canais Gilbert-Elliott

Igor Moreira e Cecilio Pimentel

Resumo— Este trabalho compara três métodos para estimação dos parâmetros de um modelo de canal de estados finitos Markovianos, mais especificamente o canal Gilbert-Elliott (GEC), de modo a aproximar um canal discreto com desvanecimento. Para isso, o método proposto por Wilhelmsson e Milstein e o algoritmo Baum-Welch, já utilizados na literatura, foram comparados com o método de minimização da divergência de Kullback-Leibler entre duas medidas de probabilidade geradas pelo GEC e pelo canal com desvanecimento. A precisão dos modelos obtidos com cada técnica será avaliada comparando-se curvas da função autocorrelação, da vazão do protocolo GBN e da probabilidade de uma decodificação sem sucesso de um código de bloco.

Palavras-Chave— Canais de estados finitos Markovianos, desvanecimento, estimação de parâmetros, probabilidade de erro.

Abstract— This paper compares three methods for estimating the parameters of class of finite state Markov channels, specifically the Gilbert Elliot channel (GEC), so as to approximate a discrete fading channel. For this, the method proposed by Wilhelmsson and Milstein and the Baum-Welch algorithm, already used in the literature, are compared with the minimization of the Kullback-Leibler divergence between two probability measures. The accuracy of the GEC obtained with each estimation technique is measured in terms of the autocorrelation function, the throughput of the Go-Back-N protocol and the probability of an unsuccessfully decoding of a block code.

Keywords— Finite-state Markovian channels, fading, parameters estimation, error probability.

I. INTRODUÇÃO

Canais de comunicação sem fio são caracterizados por sofrer desvanecimento multi-percurso. Esse fenômeno caracteriza um canal de comunicação em que os erros são correlacionados temporalmente, ou seja, um erro em um certo instante aumenta a probabilidade de erro no futuro próximo. Essa dependência estatística é denominada memória do canal.

Este trabalho emprega uma classe de canais de estados finitos Markovianos (FSMC, *Finite State Markov Channels*) conhecida como canais Gilbert-Elliott para modelar a sequência de erro produzida por um canal discreto com desvanecimento (DFC, *Discrete Fading Channel*). O DFC considerado neste trabalho consiste em um modulador de deslocamento de fase binário (BPSK, *Binary Phase-Shift Keying*), um canal com desvanecimento Rayleigh com função autocorrelação conhecida e um demodulador coerente com decisão abrupta.

Um problema fundamental na área de modelamento de canais é encontrar um método eficiente para achar os parâmetros de um modelo FSMC de tal forma que este tenha um comportamento estatístico semelhante ao canal que se

deseja modelar. O objetivo deste trabalho consiste em comparar a precisão de três métodos de estimação dos parâmetros de um GEC que aproxima um DFC. O primeiro método considerado é o proposto por Wilhelmsson e Milstein [1]. Esse é largamente utilizado na literatura [2]–[6] para modelar canais com desvanecimento usando modelos GEC. O segundo método é o algoritmo Baum-Welch, que é um procedimento iterativo que maximiza uma função de verossimilhança e pode ser usado em qualquer FSMC. A precisão deste método depende das condições iniciais dos parâmetros do FSMC e uma convergência para um máximo global não é assegurada. Propõe-se um método para estimar os parâmetros do GEC que minimiza a divergência de Kullback-Leibler [7] entre duas medidas de probabilidade produzidas pelo DFC e pelo GEC. A precisão dos modelos GEC obtidos com cada método para aproximar um DFC é discutida a partir da comparação de estatísticas geradas pelo DFC e pelo modelo GEC.

II. CANAIS DE COMUNICAÇÕES DISCRETOS

A. O Canal Gilbert-Elliott

Um FSMC é um canal discreto que possui um conjunto finito de estados cuja transição entre esses é descrita por uma cadeia de Markov, a qual tem probabilidades de transição atribuídas de forma independente do tempo. A cada estado é associada uma determinada probabilidade de geração de erros.

Considera-se canais discretos binários (sobre o alfabeto $\{0, 1\}$) sendo $\{X_k\}$ e $\{Y_k\}$ os processos binários de entrada e de saída do canal, respectivamente. Os processos de entrada e saída podem ser expressos como uma função explícita de um processo de erro $\{Z_k\}$ da forma $Y_k = X_k \oplus Z_k$, em que \oplus denota soma módulo 2. O processo de erro gerado por um GEC será descrito a seguir.

O GEC [8], [9] consiste de uma cadeia de Markov estacionária, homogênea, com dois estados. Quando a cadeia se encontra no estado 0, Z_k é igual a 1 (erro) com probabilidade P_G , ou 0 (sem erro) com probabilidade $1 - P_G$. Quando a cadeia se encontra no estado 1, Z_k é igual a 1 com probabilidade P_B , ou 0 com probabilidade $1 - P_B$. Por definição, $P_G < P_B$ e, por isso, os estados 0 e 1 são chamados de estados “bom” e “ruim”, respectivamente. As probabilidades de transição da cadeia de Markov são $p_{0,1} = Q$ e $p_{1,0} = q$. A matriz de transição de probabilidade é denotada por \mathbf{P} . Define-se a matriz $\mathbf{P}(0)$ com o (i, j) -ésimo elemento igual a probabilidade do canal transicionar do estado i para o estado j e gerar o símbolo Z_k igual a zero. Uma definição similar é válida para a matriz $\mathbf{P}(1)$ para Z_k igual a 1. O vetor de estados estacionários é representado por $\mathbf{\Pi}$. As matrizes para o modelo GEC são dadas por:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 - Q & Q \\ q & 1 - q \end{bmatrix} \quad (1)$$

Igor Moreira, Agência Nacional de Telecomunicações, Brasília-DF, email: igormoura@anatel.gov.br. Cecilio Pimentel, CODEC/DES/UFPE, Recife-PE, email: cecilio@ufpe.br.

Este trabalho recebeu suporte do CNPq e FACEPE.

$$\mathbf{P}(0) = \begin{bmatrix} (1-Q)(1-P_G) & Q(1-P_B) \\ q(1-P_G) & (1-q)(1-P_B) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{P}(1) = \begin{bmatrix} (1-Q)P_G & QP_B \\ qP_G & (1-q)P_B \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{\Pi} = [\pi_0 \ \pi_1]^T = \left[\frac{q}{Q+q} \quad \frac{Q}{Q+q} \right]^T \quad (4)$$

em que o superscrito $[\cdot]^T$ indica a transposta de uma matriz. É possível calcular a probabilidade de qualquer sequência de erro $\mathbf{z}_n = (z_1, \dots, z_n)$ usando a seguinte relação matricial:

$$P(\mathbf{z}_n) = \mathbf{\Pi}^T \left(\prod_{k=1}^n \mathbf{P}(z_k) \right) \mathbf{1} \quad (5)$$

em que $\mathbf{1}$ é um vetor coluna com todos os elementos iguais a 1. Por exemplo, a probabilidade do GEC produzir um erro no instante k é igual a

$$P(1) \triangleq P(Z_k = 1) = \pi_0 P_G + \pi_1 P_B.$$

As matrizes (1)-(4) são usadas para derivar expressões para estatísticas do canal GEC, bem como para avaliar o desempenho de protocolos e de códigos corretores de erro operando em canais GEC. Por exemplo, a função autocorrelação, denominada de $R[m]$, para o GEC é expressa da seguinte forma:

$$R[m] = (P(1))^2 + \frac{Qq(P_B - P_G)^2}{(q+Q)^2} (1-q-Q)^m \quad (6)$$

para $m > 1$ e o coeficiente de correlação é dado por:

$$\text{Cor}_{\text{GEC}} = \frac{(1-q-Q)(P_B - P_G)^2 \pi_0 (1-\pi_0)}{p(1)(1-p(1))}.$$

A análise do protocolo de retransmissão ARQ Go-Back-N (GBN) em canais GEC foi realizada em [10]. Nesse trabalho, foi desenvolvida uma fórmula para a vazão deste protocolo, denotada por η , para um esquema ARQ puro que usa um código de detecção de erros de comprimento n :

$$\eta = \frac{\mathbf{\Pi}^T \mathbf{P}(A) \mathbf{1}}{\mathbf{\Pi}^T \mathbf{P}(A) \mathbf{X} \left[N \mathbf{P}(\bar{A}) (\mathbf{P}^n)^{N-1} \mathbf{X} + \mathbf{I} \right] \mathbf{P}(A) \mathbf{1}} \quad (7)$$

em que $\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{P}(\bar{A}) (\mathbf{P}^n)^{N-1})^{-1}$, \mathbf{I} é a matriz identidade e $\mathbf{P}(A)$ é a matriz que especifica o evento transmissão com sucesso de um pacote. Desprezando a probabilidade de uma decodificação sem sucesso, as matrizes $\mathbf{P}(A)$ e $\mathbf{P}(\bar{A})$ são:

$$\mathbf{P}(A) = \mathbf{P}^n(0) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}(\bar{A}) = \mathbf{P}^n - \mathbf{P}^n(0) \quad (9)$$

Considera-se a transmissão de palavras código de um código de bloco binário e linear, de comprimento n e capacidade de correção t . A probabilidade de uma decodificação sem sucesso, denominada de PCE, é dada por:

$$\text{PCE} = 1 - \sum_{m=0}^t P(m, n) \quad (10)$$

em que $P(m, n)$ é a probabilidade de ocorrerem m erros em uma sequência de comprimento n . Para o GEC, uma fórmula recursiva para $P(m, n)$ é [11]:

$$\begin{aligned} P(m, n) = & -c_1 P(m, n-1) - c_2 P(m-1, n-1) \\ & -c_3 P(m, n-2) - c_4 P(m-1, n-1) \\ & -c_5 P(m-2, n-2), \end{aligned} \quad (11)$$

em que

$$\begin{aligned} c_1 &= Q(1-g) + q(1-b) - (2-b-g); \\ c_2 &= -[b(1-q) + g(1-Q)]; \\ c_3 &= (1-b)(1-g)(1-q-Q); \\ c_4 &= (g+b+2gb)(1-q-Q); \\ c_5 &= bg(1-q-Q). \end{aligned} \quad (12)$$

Neste trabalho, utiliza-se o GEC para modelar um sistema de comunicações com desvanecimento que será descrito na próxima subseção. A precisão dos modelos obtidos com as três técnicas de estimação de parâmetros consideradas será avaliada via comparação das estatísticas e métricas de desempenho descritas nesta seção com as obtidas pelo canal de comunicações.

B. Canal Discreto com Desvanecimento

Este trabalho considera um DFC composto por um modulador BPSK, um canal com desvanecimento Rayleigh correlacionado no tempo, não seletivo em frequência e com ruído aditivo Gaussiano branco, e um demodulador coerente com quaturização abrupta. A envoltória complexa do desvanecimento $\tilde{G}(t) = \tilde{G}_I(t) + j\tilde{G}_Q(t)$ é um processo Gaussiano complexo, estacionário no sentido amplo, com média zero, $\mathbf{E}[\tilde{G}(t)] = 0$ e segundo momento normalizado, $\mathbf{E}[|\tilde{G}(t)|^2] = 1$. Os componentes em quadratura $\tilde{G}_I(t)$ e $\tilde{G}_Q(t)$ são processos Gaussianos mutuamente independentes que possuem a mesma função covariância que, adotando-se o modelo de desvanecimento de Clarke, pode ser expressa como [12], [13]

$$C(\tau) = \mathbf{E}\{\tilde{G}^*(t)[\tilde{G}(t+\tau)]\} = J_0(2\pi f_D \tau) \quad (13)$$

em que $J_0(x)$ é a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero e f_D é a máxima frequência Doppler. Para um instante de tempo fixo, $t = kT$, a envoltória do desvanecimento $A_k \triangleq \sqrt{\tilde{G}_I^2(kT) + \tilde{G}_Q^2(kT)}$ (onde $1/T$ é a taxa de sinalização) tem função densidade de probabilidade Rayleigh. A k -ésima amostra do sinal recebido é dada por:

$$R_k = \sqrt{E_s} A_k S_k + N_k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (14)$$

em que $S_k \in \{2X_k - 1\}$, E_s é a energia do sinal transmitido, $\{N_k\}$ é uma variável aleatória Gaussiana com média zero e variância $N_0/2$. Define-se a relação sinal-ruído média do sinal recebido por $\text{SNR} = E_s/N_0$. A função de autocorrelação para o DFC é dada pela equação (15) no topo da próxima página, em que $\rho = J_0(2\pi m f_D T)$. A vazão e a PCE para o DFC são calculadas via simulação.

$$R[m] = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2}{\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \frac{E_s}{N_0} (\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2) + \left(\frac{E_s}{N_0}\right)^2 (1 - \rho^2)} d\theta_1 d\theta_2. \quad (15)$$

III. ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DO MODELO GEC

Esta seção descreve dois métodos largamente utilizados para estimar os parâmetros de modelos GEC. O primeiro foi proposto por Wilhelmsson e Milstein [1] e é aqui denominado por WM, enquanto o segundo é conhecido como algoritmo Baum-Welch (BW) [14]. Um método alternativo proposto neste trabalho consiste na estimação de parâmetros baseada na minimização da divergência de Kullback-Leibler [7], denominado de método KL.

A. O Método WM

O método WM para estimação de parâmetros de um GEC [1], considera α_t e γ_t como limiares dos níveis de amplitude e da relação sinal-ruído, respectivamente, para os quais o canal muda de estado. A relação sinal ruído instantânea (γ) é uma variável aleatória exponencial com função densidade de probabilidade $p(\gamma)$ dada por:

$$p(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \quad \gamma \geq 0 \quad (16)$$

em que $\bar{\gamma}$ é a SNR. As probabilidades de estado estacionárias do GEC são calculadas como a fração de tempo em que γ encontra-se acima ou abaixo de γ_t , isto é [1]:

$$\pi_1 = \int_0^{\gamma_t} \frac{-\gamma}{\bar{\gamma}} e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} d\gamma = 1 - e^{-\frac{\gamma_t}{\bar{\gamma}}} = 1 - e^{-\rho^2} \quad (17)$$

em que $\rho^2 = \frac{\gamma_t}{\bar{\gamma}}$. Analogamente

$$\pi_0 = \int_{\gamma_t}^{\infty} \frac{-\gamma}{\bar{\gamma}} e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} d\gamma = e^{-\frac{\gamma_t}{\bar{\gamma}}} = e^{-\rho^2}. \quad (18)$$

Em seguida, considera-se o tempo médio em que a amplitude do sinal permanece abaixo de α_t e iguala-se ao tempo médio que o GEC permanece no estado ruim, uma vez tendo entrado nele. Assim, é possível encontrar [1]

$$q = \frac{\rho f_D T \sqrt{2\pi}}{e^{-\rho^2} - 1} \quad (19)$$

$$Q = \rho f_D T \sqrt{2\pi}. \quad (20)$$

As probabilidades condicionais de erro de cada estado do GEC são calculadas como probabilidades de erro de um canal com desvanecimento Rayleigh condicionadas a probabilidade do canal estar no respectivo estado [1]:

$$P_B = \frac{1}{\pi_1} \int_0^{\gamma_t} p(\gamma) P_e(\gamma) d\gamma \quad (21)$$

e

$$P_G = \frac{1}{\pi_0} \int_{\gamma_t}^{\infty} p(\gamma) P_e(\gamma) d\gamma \quad (22)$$

em que $P_e(\gamma) = Q(\sqrt{2\gamma})$ é a probabilidade de erro do DFC para um dado valor de γ .

B. O Método BW

O algoritmo BW [14] é um algoritmo iterativo que visa estimar a matriz de transição de probabilidade e as probabilidades condicionais de geração de erros de um FSMC, baseado em uma sequência de erros observada. Uma característica importante é que o seu tempo de execução depende de vários fatores como a ordem do modelo e o comprimento da sequência de erros utilizada [15], [16]. Para cada valor dos parâmetros do DFC ($f_D T$ e SNR), uma sequência de erro do DFC é gerada por simulação (o tamanho da amostra é fixado em $N = 3 \times 10^7$) e os parâmetros do GEC são estimados usando este algoritmo. A Tabela I mostra os parâmetros do GEC obtidos para um DFC com $f_D T = 10^{-3}$, um valor típico para um canal com desvanecimento lento, e para quatro valores de SNR.

TABELA I

VALORES DOS PARÂMETROS DO GEC ESTIMADOS PELO ALGORITMO BW QUE MODELAM UM DFC COM $f_D T = 10^{-3}$.

Parâmetros do DFC	q	Q	P_G	P_B
SNR = 5 dB	0,0054	0,0022	0,0111	0,199
SNR = 10 dB	0,0013	0,0084	0,1634	0,0019
SNR = 15 dB	0,0007	0,0133	0,1464	0,0003
SNR = 20 dB	0,0241	0,0004	0,0001	0,1499

C. O Método KL

O método proposto neste trabalho usa uma medida de distância entre duas medidas de probabilidade, P_{DFC} e P_{GEC} , para estimar os parâmetros do DFC. A medida adotada é a divergência de Kullback-Leibler, que é expressa da seguinte forma:

$$D(P_{\text{DFC}} \parallel P_{\text{GEC}}) = \lim_{\ell \rightarrow \infty} \frac{1}{\ell} D_\ell(P_{\text{DFC}}(Z^\ell) \parallel P_{\text{GEC}}(Z^\ell))$$

em que $\frac{1}{\ell} D_\ell(P_{\text{DFC}}(Z^\ell) \parallel P_{\text{GEC}}(Z^\ell))$ é a divergência normalizada de ℓ -ésima ordem entre as distribuições $P_{\text{DFC}}(Z^\ell)$ e $P_{\text{GEC}}(Z^\ell)$:

$$D_\ell(P_{\text{DFC}}(Z^\ell) \parallel P_{\text{GEC}}(Z^\ell)) = \sum_{Z^\ell \in \{0,1\}^\ell} P_{\text{DFC}}(Z^\ell) \log_2 \frac{P_{\text{DFC}}(Z^\ell)}{P_{\text{GEC}}(Z^\ell)} \quad (23)$$

em que $P_{\text{DFC}}(Z^\ell)$ é obtida via simulação do DFC e $P_{\text{GEC}}(Z^\ell)$ é calculada matricialmente usando (5).

O método proposto consiste em escolher os quatro parâmetros do GEC que minimizem (23) para um valor de ℓ fixo, com a restrição que o DFC e o GEC tenham o mesmo coeficiente de correlação e a mesma probabilidade de ocorrer um erro, isto é, $\text{Cor}_{\text{DFC}} = \text{Cor}_{\text{GEC}}$ e $P_{\text{DFC}}(1) = P_{\text{GEC}}(1)$, para ℓ fixo. A Tabela II mostra os parâmetros obtidos com a minimização de $D_{10}(P_{\text{DFC}} \parallel P_{\text{GEC}})$.

TABELA II

VALORES DOS PARÂMETROS DO GEC ESTIMADOS PELA MINIMIZAÇÃO DA DIVERGÊNCIA DE KULLBACK-LEIBLER DE ℓ -ÉSIMA ORDEM QUE MODELAM UM DFC COM $f_D T = 10^{-3}$, $\ell = 10$.

Parâmetros do DFC	q	Q	P_G	P_B
SNR = 5 dB	0,01048	0,00274	0,0156	0,25
SNR = 10 dB	0,01038	0,00085	0,0055	0,24
SNR = 15 dB	0,02056	0,00057	0,0015	0,23
SNR = 20 dB	0,0019	0,00001	0,0005	0,22

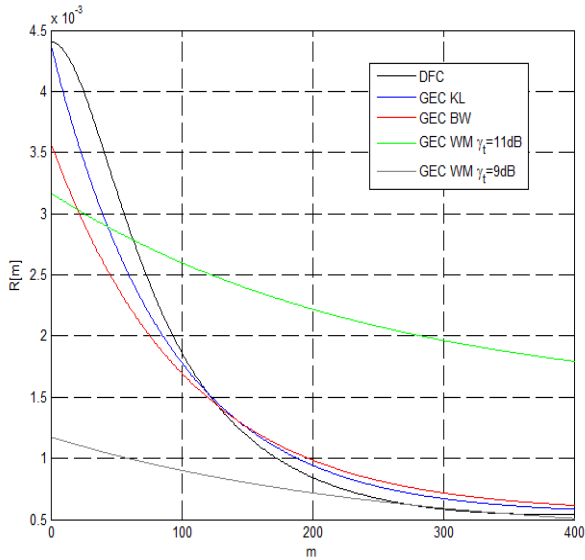


Fig. 1. Função de autocorrelação de GEC que aproximam um DFC com $f_D T = 10^{-3}$ e SNR = 10 dB.

IV. RESULTADOS

Para mensurar a exatidão de cada método de estimação dos parâmetros de um GEC, será feita uma comparação de algumas estatísticas do DFC e dos GEC estimados por cada uma das três técnicas.

Na Figura 1 são mostradas as curvas da função autocorrelação para um DFC com $f_D T = 10^{-3}$ e SNR = 10 dB e os respectivos GEC estimados com os três métodos. Para os modelos obtidos com o WM, são mostradas curvas para dois valores de γ_t . Observa-se que os modelos gerados por WM não geram uma boa aproximação para a curva do DFC (para qualquer valor de γ_t), enquanto o método KL apresenta a melhor aproximação. Para valores elevados de m as curvas convergem para a autocorrelação de um canal sem memória.

Para realizar uma comparação entre os métodos usando a vazão de um protocolo GBN, deve-se encontrar, inicialmente, um valor conveniente para o limiar γ_t do método WM para cada valor de SNR considerado. Na Figura 2 é possível verificar que dado um valor de SNR existe um γ_t que melhor aproxima a vazão do DFC. Nesta figura foram utilizados os seguintes valores de γ_t : SNR, SNR + 2 dB, SNR + 3 dB, SNR + 4 dB. Por exemplo, pode-se verificar nesta figura que para SNR = 10 dB, a melhor aproximação é atingida com $\gamma_t =$ SNR = 10 dB. A Tabela III resume os valores dos parâmetros dos GEC encontrados para o valor de γ_t selecionado.

A Figura 3 compara as curvas da vazão do DFC e de

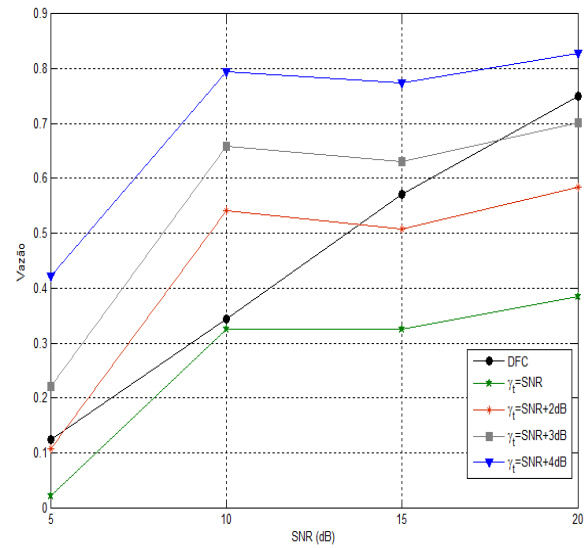


Fig. 2. Comparação da vazão do protocolo GBN do DFC e de GEC estimados pelo método WM para um DFC com $f_D T = 10^{-3}$, $n = 10$ e $N = 80$

TABELA III

VALORES DOS PARÂMETROS DO GEC CALCULADOS PELO MÉTODO WM QUE APROXIMAM A VAZÃO DO DFC COM $f_D T = 10^{-3}$.

Parâmetros do DFC	q	Q	P_G	P_B
SNR = 5 dB ($\gamma_t = 7$ dB)	0,0031	0,00081	0,0056	0,1418
SNR = 10 dB ($\gamma_t = 10$ dB)	0,0025	0,0014	0,00018	0,0730
SNR = 15 dB ($\gamma_t = 17$ dB)	0,0031	0,00081	$1,7e^{-9}$	0,0202
SNR = 20 dB ($\gamma_t = 23$ dB)	0,0035	0,0005	$1e^{-12}$	0,0061

modelos GEC com parâmetros que foram estimados por cada um dos três métodos. Para valores de SNR até 10 dB, o método WM se mostra mais vantajoso, até mesmo pela sua baixa complexidade computacional em relação aos demais. O método BW é o mais adequado para valores de SNR maiores de 15 dB.

Para realizar uma comparação da PCE entre os métodos, fez-se necessário estudar um valor conveniente para o limiar γ_t do método WM para cada valor de SNR considerado, de forma que, dado um valor de SNR, existe um γ_t que melhor aproxima a PCE do DFC. A Tabela IV resume os valores dos parâmetros dos GEC encontrados para o valor de γ_t selecionado.

TABELA IV

VALORES DOS PARÂMETROS DO GEC CALCULADOS PELO MÉTODO WM QUE APROXIMAM A PCE DO DFC COM $f_D T = 10^{-3}$.

Parâmetros do DFC	q	Q	P_G	P_B
SNR = 5 dB ($\gamma_t = 5$ dB)	0,0031	0,00081	0,0056	0,1418
SNR = 10 dB ($\gamma_t = 8$ dB)	0,0019	0,0022	0,00012	0,0974
SNR = 15 dB ($\gamma_t = 9$ dB)	0,0012	0,0043	0,00018	0,0719
SNR = 20 dB ($\gamma_t = 9$ dB)	0,0007	0,0085	0,00006	0,0682

A Figura 4 mostra o comportamento da PCE versus a SNR, para um DFC com $f_D T = 10^{-3}$ e para os modelos GEC. Esta probabilidade foi obtida utilizando-se um código de bloco binário, linear, de comprimento $n = 255$ e capacidade de correção $t = 29$. É possível observar nesta figura que o GEC

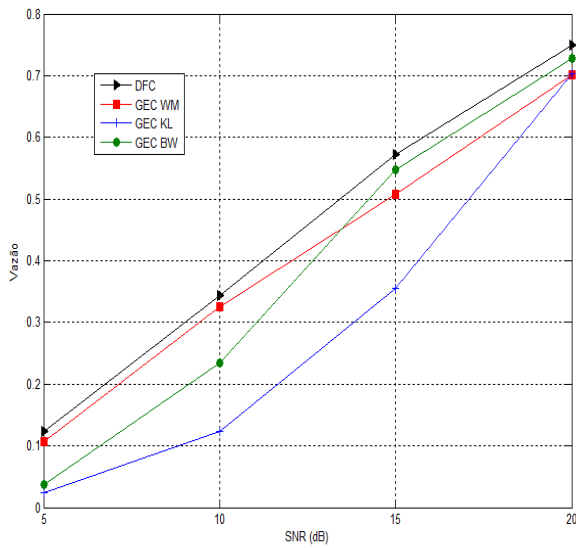


Fig. 3. Comparação da vazão do DFC e de modelos GEC para $f_D T = 10^{-3}$, $n = 10$ e $N = 80$.

com parâmetros calculados pelo método WM (para os valores de γ_t mostrados na Tabela IV) apresenta um comportamento discrepante da curva do DFC. O GEC obtido com o método BW se mostra mais preciso.

De acordo com as curvas analisadas, o método proposto por WM mostra-se mais vantajoso apenas na análise da vazão. Contudo, esse método é dispendioso, tendo em vista que, para a obtenção desse resultado, há a necessidade de ensaios prévios para a determinação do valor adequado de γ_t para métrica de desempenho considerada (observe que os valores de γ_t nas Tabelas III e IV são diferentes). A análise das curvas da função autocorrelação sugere que tanto o método BW quanto KL são robustos e eficientes para a estimação dos parâmetros do GEC.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisadas três técnicas de estimação dos parâmetros do GEC. Foram geradas tabelas dos parâmetros de modelos GEC que aproximam um DFC. Em seguida, foram analisadas a função autocorrelação, a vazão do protocolo GBN e probabilidade de uma decodificação sem sucesso, a fim de estudar a precisão dos métodos de estimação de parâmetros. A precisão do método WM é bastante sensível à escolha de um limiar ótimo para γ_t , que depende dos parâmetros do DFC e da métrica de desempenho que está sendo analisada. As curvas da vazão e da PCE indicam que, na região com SNR de maior interesse, o método BW é o mais preciso.

REFERÊNCIAS

- [1] L. Wilhelmsson and L. B. Milstein, "On the effect of imperfect interleaving for the Gilbert-Elliott channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, pp. 681–688, May 1999.
- [2] M. Papaleo, R. Ferrinceli, G. E. Corazza, and A. Vanelli-Coralli, "Packet coding performance with correlated fading and shadowing," *Proc. IEEE Proc. Global Telecommun. Conf. (GLOBECOM), Honolulu, USA*, pp. 1–8, 2009.

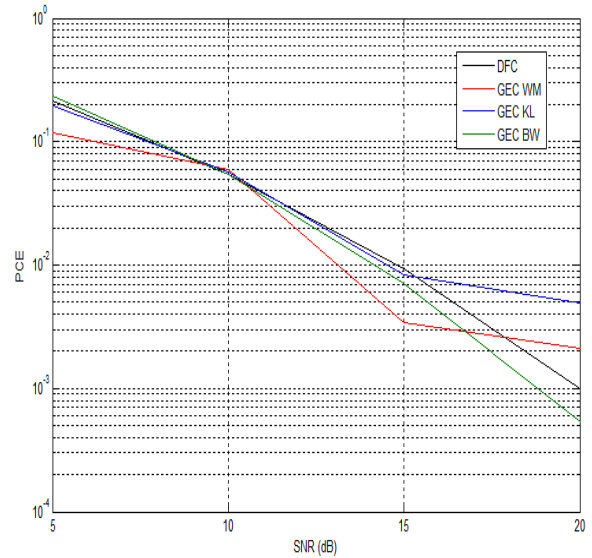


Fig. 4. PCE versus SNR para um código de bloco binário, linear, de comprimento $n = 255$, capacidade de correção $t = 29$, em canais GEC e no DFC com $f_D T = 10^{-3}$.

- [3] C.-M. Lee, Y. T. Su, and L.-D. Jeng, "Performance analysis of block codes in hidden Markov channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 56, no. 1, 2008.
- [4] C.-M. Lee and Y. T. Su, "Performance of block-coded land mobile satellite systems," *International Journal of Satellite Communications*, vol. 26, pp. 251–267, 2008.
- [5] F. Hamidi-Sepehr, Y. Cai, H. D. Pfister, and J.-F. Chamberland, "Queueing behavior of the Gilbert-Elliott channel: BCH and poisson arrivals," *Proc. International Symposium on Information Theory, Saint Petersburg, Russia*, pp. 1806–1810, 2011.
- [6] A. Seddiki, A. Djebbari, J. M. Rouvaen, and A. Taleb-Ahmed, "BCH coding performance evaluation on a land mobile channel based OFDM system," *Information Technology Journal*, vol. 5, no. 930–936, 2006.
- [7] L. Zhong, F. I. Alajaji, and G. Takahara, "A binary communication channel with memory based on a finite queue," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 53, pp. 2815–2840, Aug. 2007.
- [8] E. N. Gilbert, "Capacity of a burst-noise channel," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 39, pp. 1253–1266, Sept. 1960.
- [9] E. O. Elliot, "Estimates of error rates for codes on burst-noise channels," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 42, pp. 1977–1997, Sept. 1963.
- [10] C. Pimentel and R. L. Siqueira, "Analysis of the Go-Back-N protocol on finite-state Markov Rician fading channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 4, pp. 2627–2632, July 2008.
- [11] R. P. Ramos and C. Pimentel, "Análise de desempenho de códigos de bloco em canais de estados finitos entrelaçados," *Proc. IX Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, João Pessoa, PB*, pp. 405–499, 2000.
- [12] R. H. Clarke, "A statistical theory of mobile-radio reception," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 47, pp. 957–1000, 1968.
- [13] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*. Wiley, 1974.
- [14] L. E. Baum, T. Petrie, G. Soules, and N. Weiss, "A maximization technique occurring in the statistical analysis of probabilistic functions of markov chains," *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 41, pp. 164–171, Feb. 1970.
- [15] W. H. Tranter, K. S. Shanmugan, T. S. Rappaport, and K. L. Kosbar, *Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications*. Prentice Hall, 2003.
- [16] N. M. de Paiva Junior, E. C. Marques, and E. L. Pinto, "Viterbi training for HMM modelling of burst errors," *Proc. of the International Workshop on Telecommunications (IWT), Rio de Janeiro*, pp. 20–26, 2011.