

3

Estimativa dos Parâmetros de desempenho de erro

Neste estudo, a taxa de erro de bit é modelada por uma variável aleatória b , refletindo assim os efeitos da degradação aleatória z na razão E_b/N_0 . O comportamento estatístico do fator z é representado por sua Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa (FDPC), cuja definição é dada por

$$C_z(\Gamma) = P(z > \Gamma) = \int_{\Gamma}^{\infty} p_z(\alpha) d\alpha \quad (3-1)$$

Com base em (3-1), serão determinadas as FDPCs das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} , definidas no Capítulo 2. A partir dessas FDPCs serão estimados os parâmetros de desempenho de erro, que são calculados a partir das taxas de ocorrência dos eventos de erro. Quando as probabilidades dos eventos de erro EB, ES e SES são modeladas por variáveis aleatórias, os parâmetros de desempenho de erro correspondentes são dados pelo valor esperado dessas variáveis aleatórias. Assim,

$$ESR = E[r_{es}] \quad (3-2)$$

e

$$SESR = E[r_{ses}] \quad (3-3)$$

Do mesmo modo, a taxa de blocos errados EBR, não incluída no conjunto de parâmetros de desempenho de erro, pode ser estimada por

$$EBR = E[r_{eb}] \quad (3-4)$$

De maneira análoga, a taxa de bloco errado de fundo BBER é dada pelo valor esperado da variável aleatória r_{bbe} , ou seja,

$$BBER = E[r_{bbe}] \quad (3-5)$$

Como apresentado no Apêndice A, o valor esperado de uma variável w pode ser calculado a partir de sua Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa $C_w(W)$. Assim, as taxas EBR, ESR, SESR e BBER são estimadas a partir das FDPCs das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} , respectivamente. Estas variáveis representam probabilidades ou taxas, logo só assumem valores entre 0 e 1. Desta forma, com base em (A-9) e sendo $C_{r_{eb}}(R)$, $C_{r_{es}}(R)$, $C_{r_{ses}}(R)$ e $C_{r_{bbe}}(R)$ as FDPCs dessas variáveis,

os parâmetros de desempenho são estimados por

$$EBR = \int_0^1 C_{r_{eb}}(R)dR \quad (3-6)$$

$$ESR = \int_0^1 C_{r_{es}}(R)dR \quad (3-7)$$

$$SESR = \int_0^1 C_{r_{ses}}(R)dR \quad (3-8)$$

$$BBER = \int_0^1 C_{r_{bbe}}(R)dR \quad (3-9)$$

Uma vez que a variável r_{eb} foi modelada como função da taxa de erro de bit b , sua FDPC será determinada com base em $C_b(B)$. Se os cálculos em (3-6) a (3-9) tiverem que ser feitos sob a condição de disponibilidade, a FDPC da variável aleatória b a ser utilizada deve ser a FDPC condicional

$$C_{b|D}(B) \quad (3-10)$$

onde D é o evento que caracteriza a disponibilidade.

Uma aproximação usualmente utilizada [8] é que a condição de disponibilidade ocorre quando $\{r_{ses} < 1\}$, ou, equivalentemente, quando $\{b < B^{ses}\}$ ou $\{r_{eb} < R_{eb}^{ses}\}$, onde R_{eb}^{ses} satisfaz a equação (2-30) e B^{ses} é dado por (2-31).

O que acontece na prática é que estas estimativas são feitas em situações de alta disponibilidade, e neste caso, as estimativas condicionais são bem próximas das estimativas não condicionais, calculadas neste trabalho.

As demais variáveis foram modeladas como funções da probabilidade de bloco errado, logo suas FDPCs serão obtidas a partir da função distribuição de probabilidade cumulativa de r_{eb} , $C_{r_{eb}}(R)$.

Relacionamento entre as FDPCs das variáveis r_{eb} e b

Através da expressão em (2-12) é determinada a relação entre as funções de distribuição cumulativa de r_{eb} e b . Essa relação é expressa por

$$\begin{aligned}
C_{r_{eb}}(R) &= P(r_{eb} > R) \\
&= P\left(1 - e^{-\frac{N_B b}{\alpha}} > R\right) \\
&= P\left(b > \ln\left(\frac{1}{1-R}\right) \frac{\alpha}{N_B}\right) \\
&= C_b\left(\ln\left(\frac{1}{1-R}\right) \frac{\alpha}{N_B}\right)
\end{aligned}
\tag{3-11}$$

Relacionamento entre as FDPCs das variáveis aleatórias r_{es} e r_{eb}

A relação entre $C_{r_{es}}(R)$ e $C_{r_{eb}}(R)$, dada pela expressão abaixo, foi determinada com base em (2-14).

$$\begin{aligned}
C_{r_{es}}(R) &= P(r_{es} > R) \\
&= P\left(1 - e^{(-nr_{eb})} > R\right) \\
&= P\left(r_{eb} > \ln\left(\frac{1}{1-R}\right) \frac{1}{n}\right) \\
&= C_{r_{eb}}\left(\ln\left(\frac{1}{1-R}\right) \frac{1}{n}\right)
\end{aligned}
\tag{3-12}$$

Relacionamento entre as FDPCs das variáveis r_{ses} e r_{eb}

Considerando o relacionamento entre r_{ses} e r_{eb} , dado por (2-27), pode-se afirmar que

$$P(r_{ses} > R) = P(r_{eb} > R_{eb}^{[R]}) \tag{3-13}$$

ou seja,

$$C_{r_{ses}}(R) = C_{r_{eb}}(R_{eb}^{[R]}) \tag{3-14}$$

onde os pontos R e $R_{eb}^{[B]}$ se relacionam por

$$R = h_3(R_{eb}^{[R]}) \tag{3-15}$$

considerando (2-27)

$$R = Q \left(\frac{\sqrt{n}(0, 3 - R_{eb}^{[R]})}{\sqrt{R_{eb}^{[R]}(1 - R_{eb}^{[R]})}} \right) - Q \left(\frac{\sqrt{n}(1 - R_{eb}^{[R]})}{\sqrt{R_{eb}^{[R]}(1 - R_{eb}^{[R]})}} \right) \quad (3-16)$$

Relacionamento entre as FDPCs das variáveis r_{bbe} e r_{eb}

O relacionamento entre r_{bbe} e r_{eb} é expresso em (2-49). Conforme mostrado anteriormente, para valores pequenos de n , este relacionamento não é biunívoco. Para obter a FDPC de r_{bbe} , considere o valor R_{eb}^{ses} de r_{eb} correspondente a $r_{ses} = 1$ (R_{eb}^{ses} é solução de (2-30)). Este valor é indicado na Figura 3.1, onde o relacionamento entre r_{bbe} e r_{eb} é ilustrado para $n = 2000$. Nesta figura, está também ilustrado o valor R_{eb}^* de r_{eb} , para o qual r_{bbe} é máximo.

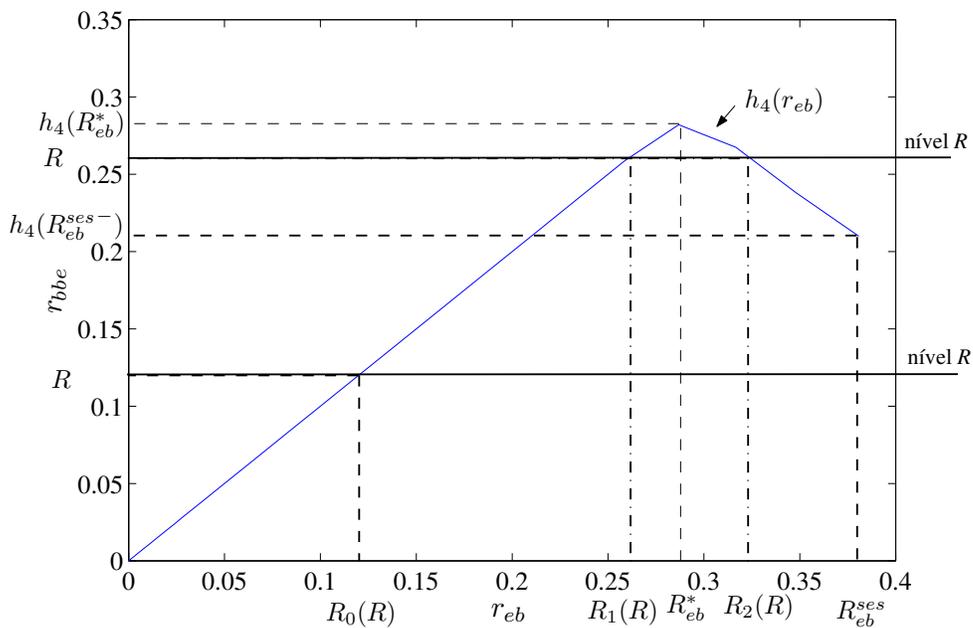


Figura 3.1: Probabilidade de bloco errado de fundo r_{bbe}

Observa-se da Figura 3.1 que se o nível R é tal que $0 \leq R \leq h_4(R_{eb}^{ses-})$ existe apenas um valor $R_0(R)$ de r_{eb} que conduz a $r_{bbe} = R$, ou seja, a equação

$$h_4(x) = \frac{\sqrt{nx(1-x)}}{n\sqrt{2\pi}(1-h_3(x))} \left[e^{-m_1^2(x)/2} - e^{-m_2^2(x)/2} \right] + \frac{x}{(1-h_3(x))} [Q(m_1(x)) - Q(m_2(x))] = R \quad (3-17)$$

tem apenas uma solução em x ($x = R_0(R)$).

Em (3-17) $h_3(\cdot)$, $m_1(\cdot)$ e $m_2(\cdot)$ são dados, respectivamente, por (2-27), (2-46) e (2-47). Por outro lado, se $h_4(R_{eb}^{ses-}) < R < h_4(R_{eb}^*)$, existem dois valores, $R_1(R)$ e $R_2(R)$, que conduzem a $r_{bbe} = R$. Neste caso, a equação (3-17) tem duas soluções ($x = R_1(R)$ e $x = R_2(R)$).

Como r_{bbe} só é definida para $r_{ses} < 1$, ou seja, se $r_{eb} < R_{eb}^{ses}$, a FDPC de r_{bbe} é dada por

$$P(r_{bbe} > R) = \begin{cases} 1 & , R < 0 \\ P(R_0(R) < r_{eb} \mid r_{eb} < R_{eb}^{ses}) & , 0 \leq R \leq h_4(R_{eb}^{ses-}) \\ P(R_1(R) < r_{eb} < R_2(R) \mid r_{eb} < R_{eb}^{ses}) & , h_4(R_{eb}^{ses-}) < R < h_4(R_{eb}^*) \\ 0 & , R \geq h_4(R_{eb}^*) \end{cases} \quad (3-18)$$

Finalmente, considerando-se a definição de FDPC, obtém-se

$$C_{r_{bbe}}(R) = \begin{cases} 1 & , R < 0 \\ \frac{C_{r_{eb}}(R_0(R)) - [C_{r_{eb}}(R_{eb}^{ses}) + P(r_{eb} = R_{eb}^{ses})]}{1 - [C_{r_{eb}}(R_{eb}^{ses}) + P(r_{eb} = R_{eb}^{ses})]} & , 0 \leq R \leq h_4(R_{eb}^{ses-}) \\ \frac{C_{r_{eb}}(R_1(R)) - [C_{r_{eb}}(R_2(R)) + P(r_{eb} = R_2(R))]}{1 - [C_{r_{eb}}(R_{eb}^{ses}) + P(r_{eb} = R_{eb}^{ses})]} & , h_4(R_{eb}^{ses-}) < R < h_4(R_{eb}^*) \\ 0 & , R \geq h_4(R_{eb}^*) \end{cases} \quad (3-19)$$

Conforme ilustrado na Figura 2.6, para grandes valores de n , $R_{eb}^* = R_{eb}^{ses} = 0,3$. Observa-se ainda que o relacionamento entre r_{bbe} e r_{eb} é biunívoco. Neste caso, a FDPC de r_{bbe} , dada por (3-19) se reduz a

$$C_{r_{bbe}}(R) = \begin{cases} 1 & , R < 0 \\ \frac{C_{r_{eb}}(R_0(R)) - [C_{r_{eb}}(0,3) + P(r_{eb}=0,3)]}{1 - [C_{r_{eb}}(0,3) + P(r_{eb}=0,3)]} & , 0 \leq R < h_4(0,3) \\ 0 & , R \geq h_4(0,3) \end{cases} \quad (3-20)$$

Como pode ser observado pelos relacionamentos em (3-11), (3-12), (3-14) e (3-19), para determinar as funções distribuição de probabilidade cumulativa das variáveis r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} é necessário conhecer o comportamento estatístico da taxa de erro de bit b , representado por sua FPDC. Note ainda que, pela relação entre a variável aleatória b e o fator de degradação z expressa em (2-8) ou em (2-9), é possível determinar $C_b(B)$ a partir de $C_z(\Gamma)$. As Figuras 3.2 e 3.3 ilustram, para um valor fixo de E_b/N_0 , o relacionamento entre a taxa de erro de bit b e a variável z para as modulações QPSK e QAM-128, respectivamente.

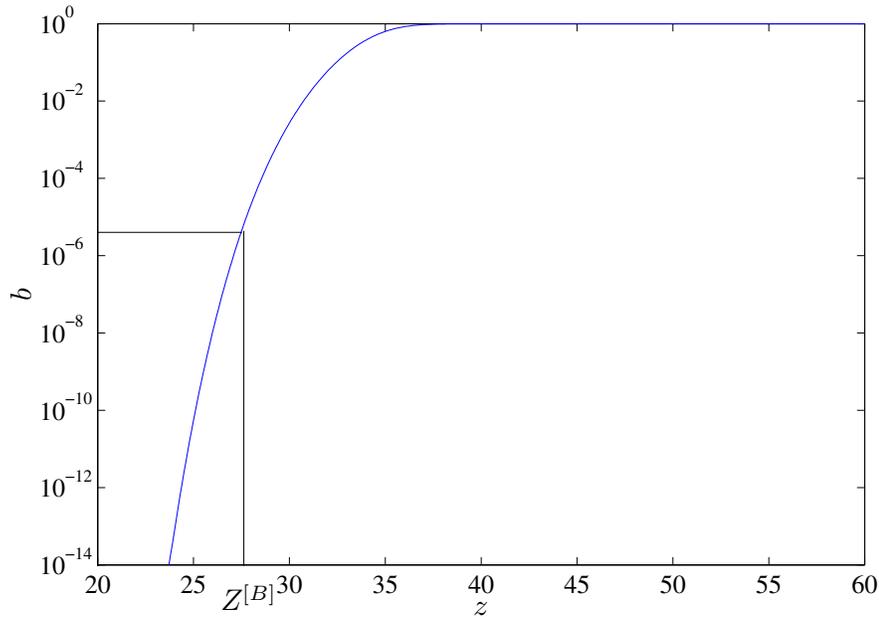


Figura 3.2: Relação entre a Taxa de Erro de Bit e o fator de degradação para a modulação QPSK

Destas Figuras é possível observar que

$$P(b \geq B) = P(z \geq Z^{[B]}) \quad (3-21)$$

ou seja,

$$C_b(B) = C_z(Z^{[B]}) \quad (3-22)$$

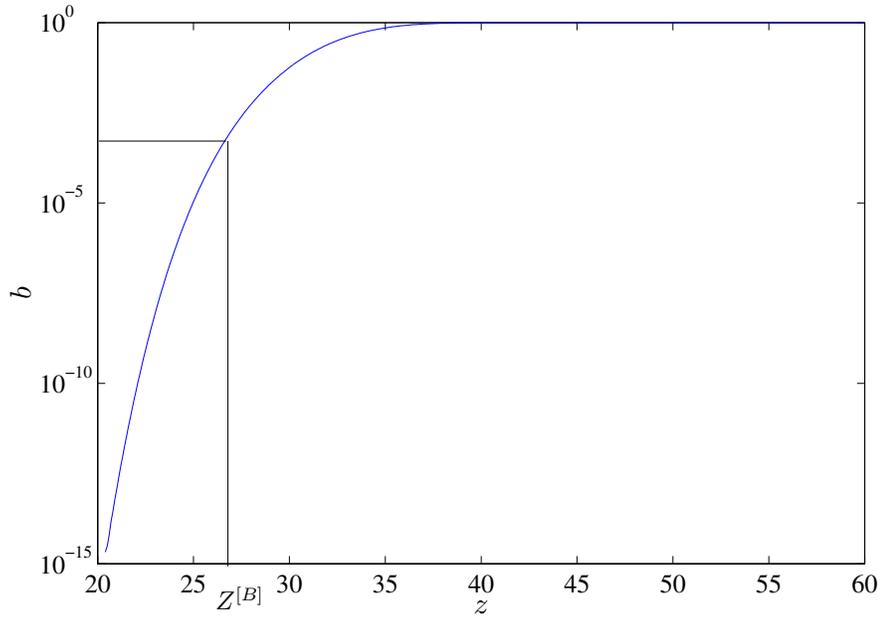


Figura 3.3: Relação entre a Taxa de Erro de Bit e o fator de degradação para a modulação QAM-128

onde os pontos $Z^{[B]}$ e B se relacionam por

$$B = Q \left(\sqrt{2 \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{CS} \frac{1}{10^{Z^{[B]}/10}}} \right) \quad (3-23)$$

para modulação QPSK e por

$$B = \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M} \log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{(M - 1)} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{CS} \frac{1}{10^{Z^{[B]}/10}}} \right) \quad (3-24)$$

para modulações QAM-M.

Uma vez determinadas as FDPCs das variáveis r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} , podem ser estimados os parâmetros de desempenho de erro.

O comportamento estatístico das degradações que afetam o sinal transmitido, caracterizado por $C_z(\Gamma)$, será determinado para os cenários seguintes:

1. A chuva é a única fonte de degradação do sinal.
2. O sinal sofre o efeito da chuva e de interferência externa.

No primeiro cenário, a estatística da atenuação causada por chuvas é estimada pelo modelo matemático definido na Recomendação da ITU-R P.530-11 [10], que permite determinar os valores de atenuação excedidos em uma porcentagem de tempo especificada. Essas atenuações dependem, dentre outros fatores, da taxa de precipitação, da frequência, do comprimento do enlace e da localização do receptor.

No segundo cenário, além do efeito da chuva, o fator de degradação z inclui os efeitos de interferência externa, cuja FDPC é conhecida.

3.1

Efeito da atenuação devida à chuva

A chuva é uma importante fonte de degradação para frequências acima de 10GHz. Pelo modelo [10] utilizado para estimar o comportamento estatístico da atenuação por chuva, esta degradação depende, dentre outros fatores, da frequência f e da taxa de precipitação R (medida em mm/h) e é determinada como um valor probabilístico devido ao comportamento estatístico de R .

Nesta seção, os parâmetros de desempenho de erro utilizados para avaliar a qualidade de um sistema de transmissão digital serão estimados para o caso em que a chuva é a única fonte de degradação do sinal. O fator de atenuação x será utilizado para representar esta degradação, logo

$$z = x \quad (3-25)$$

Consequentemente, de (2-5)

$$e = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{CS_{[dB]}} - x = f(x) \quad (3-26)$$

A Recomendação ITU-R P.530-11 [10] apresenta métodos de predição de parâmetros de propagação que afetam o planejamento de sistemas de comunicação terrestres. Uma de suas seções trata da atenuação causada por hidrometeoros e utiliza um procedimento para estimar o comportamento estatístico da atenuação por chuva. Este procedimento é apresentado na Seção C.1 do Apêndice C e permite o cálculo dos valores de atenuação A_P que são excedidos por uma porcentagem P do tempo de observação através da equação

$$\frac{A_P}{A_{0,01}} = 0,07P^{-(0,855+0,139\log_{10}P)} \quad (3-27)$$

A expressão em (3-27) é válida para enlaces com latitudes entre $30^\circ S$ e $30^\circ N$. Nela, $A_{0,01}$ corresponde à atenuação excedida em 0.01% do tempo. Esse valor é função da taxa de precipitação a ser excedida em 0.01% do tempo ($R_{0,01}$) que depende da localização do receptor. O valor de $A_{0,01}$ depende ainda da frequência em GHz, da distância em km, do ângulo de elevação e do tipo de polarização utilizados.

Os valores da taxa $R_{0,01}$ são encontrados em mapas da Recomendação ITU-R P.837-4 [9].

A equação em (3-27) fornece uma estatística anual para a atenuação devida à chuva. Para o cálculo da estatística relativa ao pior mês, foi utilizado o método apresentado na seção C.2 do Apêndice C.

A equação (3-27) permite escrever que

$$P(x > A_P) = \frac{P}{100} \quad (3-28)$$

ou seja,

$$C_x(A_P) = \frac{P}{100} = p \quad (3-29)$$

Assim, a FDPC de x é dada por

$$C_x(\chi) = p \quad (3-30)$$

onde p é obtido resolvendo-se as equações

$$\chi = A_{0,01} 0,07(100p)^{-(0,855+0,139(\log_{10} p+2))} \quad (3-31)$$

para $\chi \in \mathbb{R}$.

Entretanto, como evidenciado na Recomendação ITU-R P.530-11, o modelo de estimação da estatística da chuva é adequado para valores de probabilidade p , onde $10^{-5} \leq p \leq 10^{-2}$.

Assim, o modelo permite a determinação de $C_x(\chi)$ apenas para valores de χ no intervalo $I_x = [\chi_1, \chi_2]$, onde χ_1 e χ_2 são obtidos a partir de (3-31), sendo dados por

$$\chi_1 = A_{0,01} 0,07(1)^{-(0,855+0,139(0))} = 0,07A_{0,01} \quad (3-32)$$

$$\chi_2 = A_{0,01} 0,07(0.001)^{-(0,855+0,139(-3))} = 1,4424A_{0,01} \quad (3-33)$$

O conhecimento restrito da FDPC de x limita o conhecimento das FDPCs das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} aos intervalos $I_{r_{eb}}$, $I_{r_{es}}$, $I_{r_{ses}}$ e $I_{r_{bbe}}$, respectivamente.

Estes intervalos podem ser obtidos considerando-se (2-10), (2-14), (2-27), (2-

49), (2-46) e (2-47) e são dados por

$$I_{reb} = [g_1(\chi_1), g_1(\chi_2)] \quad (3-34)$$

$$I_{res} = [g_2(\chi_1), g_2(\chi_2)] \quad (3-35)$$

$$I_{ses} = [g_3(\chi_1), g_3(\chi_2)] \quad (3-36)$$

$$I_{bbe} = [g_4(\chi_1), g_4(\chi_2)] \quad (3-37)$$

onde

$$g_1(\chi_i) = 1 - \exp\left(\frac{-N_B}{\alpha} Q\left(\sqrt{2\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{CS} \frac{1}{10^{\chi_i/10}}}\right)\right), \quad i = 1, 2 \quad (3-38)$$

$$g_2(\chi_i) = h_2(g_1(\chi_i)) = 1 - e^{(-ng_1(\chi_i))}, \quad i = 1, 2 \quad (3-39)$$

$$g_3(\chi_i) = h_3(g_1(\chi_i)) \quad (3-40)$$

$$= Q\left(\frac{\sqrt{n}(0,3 - g_1(\chi_i))}{\sqrt{g_1(\chi_i)(1 - g_1(\chi_i))}}\right) - Q\left(\frac{\sqrt{n}(1 - g_1(\chi_i))}{\sqrt{g_1(\chi_i)(1 - g_1(\chi_i))}}\right), \quad i = 1, 2$$

e

$$g_4(\chi_i) = h_4(g_1(\chi_i)) \quad (3-41)$$

$$= \frac{\sqrt{ng_1(\chi_i)(1 - g_1(\chi_i))}}{n\sqrt{2\pi}[1 - g_3(\chi_i)]} \left[e^{-m_1^2(g_1(\chi_i))/2} - e^{-m_2^2(g_1(\chi_i))/2} \right] + \frac{g_1(\chi_i)}{1 - g_3(\chi_i)} [Q(m_1(g_1(\chi_i))) - Q(m_2(g_1(\chi_i)))] \quad , i = 1, 2 \quad (3-42)$$

Devido ao conhecimento parcial das FDPCs das diversas variáveis aleatórias, a estimação dos parâmetros de desempenho de erro, feita através de (3-6), (3-7), (3-8) e (3-9) fica prejudicada. Assim, é utilizado um procedimento que permite o cálculo de limitantes inferiores e superiores para estes parâmetros. Tais limitantes, aplicáveis ao cálculo dos valores esperados de uma variável aleatória quando sua FDPC não é totalmente conhecida, são apresentados no Apêndice B. São, então, definidos os seguintes limitantes para os parâmetros de desempenho:

$$C_{reb}(g_1(\chi_1))g_1(\chi_1) + \int_{g_1(\chi_1)}^{g_1(\chi_2)} C_{reb}(R)dR \leq EBR \leq g_1(\chi_1) + \int_{g_1(\chi_1)}^{g_1(\chi_2)} C_{reb}(R)dR + C_{reb}(g_1(\chi_2))(1 - g_1(\chi_2)) \quad (3-43)$$

$$\begin{aligned}
C_{r_{es}}(g_2(\chi_1))g_2(\chi_1) + \int_{g_2(\chi_1)}^{g_2(\chi_2)} C_{r_{es}}(R)dR \leq ESR \leq \\
g_2(\chi_1) + \int_{g_2(\chi_1)}^{g_2(\chi_2)} C_{r_{es}}(R)dR + C_{r_{es}}(g_2(\chi_2))(1 - g_2(\chi_2))
\end{aligned} \quad (3-44)$$

$$\begin{aligned}
C_{r_{ses}}(g_3(\chi_1))g_3(\chi_1) + \int_{g_3(\chi_1)}^{g_3(\chi_2)} C_{r_{ses}}(R)dR \leq SESR \leq \\
g_3(\chi_1) + \int_{g_3(\chi_1)}^{g_3(\chi_2)} C_{r_{ses}}(R)dR + C_{r_{ses}}(g_3(\chi_2))(1 - g_3(\chi_2))
\end{aligned} \quad (3-45)$$

$$\begin{aligned}
C_{r_{bbe}}(g_4(\chi_1))g_4(\chi_1) + \int_{g_4(\chi_1)}^{g_4(\chi_2)} C_{r_{bbe}}(R)dR \leq BBER \leq \\
g_4(\chi_1) + \int_{g_4(\chi_1)}^{g_4(\chi_2)} C_{r_{bbe}}(R)dR + C_{r_{bbe}}(g_4(\chi_2))(1 - g_4(\chi_2))
\end{aligned} \quad (3-46)$$

Como observado por (3-43), (3-44), (3-45) e (3-46), os parâmetros de desempenho de erro, na presença de chuva, serão estimados como valores entre os respectivos limitantes.

3.2

Efeito da degradação devida à chuva e à interferência externa

Nesta fase do estudo, são consideradas as degradações devidas à chuva e à interferência externa na relação E_b/N_0 , representadas, respectivamente, pelos fatores x e y . Neste caso, o fator z que caracteriza a degradação total se escreve

$$z = x + y \quad (3-47)$$

Considerando-se que as degradações devidas a chuvas e interferências externas são estatisticamente independentes, tem-se que

$$p_z(\Gamma) = p_x(\Gamma) * p_y(\Gamma) \quad (3-48)$$

ou seja,

$$p_z(\Gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} p_y(\alpha)p_x(\Gamma - \alpha)d(\alpha) \quad (3-49)$$

Neste caso, a função distribuição de probabilidade da variável z , dada por

$$F_z(\Gamma) = \int_{-\infty}^{\Gamma} p_z(\beta) d\beta \quad (3-50)$$

se escreve

$$F_z(\Gamma) = \int_{-\infty}^{\Gamma} \int_{-\infty}^{\infty} p_y(\alpha) p_x(\beta - \alpha) d(\alpha) d\beta \quad (3-51)$$

ou ainda,

$$F_z(\Gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\Gamma} p_x(\beta - \alpha) d\beta \right] p_y(\alpha) d\alpha \quad (3-52)$$

A expressão entre colchetes em (3-52) corresponde a $F_x(\Gamma - \alpha)$. Tem-se assim

$$F_z(\Gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} F_x(\Gamma - \alpha) p_y(\alpha) d\alpha \quad (3-53)$$

ou seja,

$$F_z(\Gamma) = F_x(\Gamma) * p_y(\Gamma) \quad (3-54)$$

Considerando que

$$C_x(\chi) = 1 - F_x(\chi) \quad (3-55)$$

é possível reescrever (3-54) como

$$C_z(\Gamma) = 1 - [(1 - C_x(\Gamma)) * p_y(\Gamma)] = C_x(\Gamma) * p_y(\Gamma) \quad (3-56)$$

Assim, a estatística do fator de degradação z , representada por sua função de distribuição cumulativa $C_z(\Gamma)$, é estimada pela convolução entre a função distribuição de probabilidade do fator de degradação x devida à chuva (determinada pelo procedimento da Recomendação ITU-R P.530-11) e a função densidade de probabilidade do fator de degradação y devida à interferência.

Note que o conhecimento parcial de FDPC de x implica em um conhecimento parcial da FDPC da variável aleatória z , assim, $C_z(\Gamma)$ será conhecida em um intervalo $I_z = [\Gamma_1, \Gamma_2]$. Como as FDPCs das demais variáveis aleatórias são determinadas a partir de $C_z(\Gamma)$, elas também serão conhecidas apenas em certos intervalos.

Desta forma, um procedimento análogo ao da Seção 3.1 conduz a determinação dos intervalos $I_{r_{eb}}$, $I_{r_{es}}$, $I_{r_{ses}}$ e $I_{r_{bbe}}$ nos quais as FDPCs das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} são conhecidas respectivamente. Considerando-se (2-10), (2-14), (2-27), (2-49), (2-46) e (2-47), esses intervalos são dados por

$$I_{r_{eb}} = [g_1(\Gamma_1), g_1(\Gamma_2)] \quad (3-57)$$

$$I_{res} = [g_2(\Gamma_1), g_2(\Gamma_2)] \quad (3-58)$$

$$I_{reses} = [g_3(\Gamma_1), g_3(\Gamma_2)] \quad (3-59)$$

$$I_{rbbe} = [g_4(\Gamma_1), g_4(\Gamma_2)] \quad (3-60)$$

onde

$$g_1(\Gamma_i) = 1 - \exp\left(\frac{-N_B}{\alpha} Q\left(\sqrt{2\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{CS} \frac{1}{10^{\Gamma_i/10}}}\right)\right), \quad i = 1, 2 \quad (3-61)$$

$$g_2(\Gamma_i) = h_2(g_1(\Gamma_i)) = 1 - e^{(-ng_1(\Gamma_i))}, \quad i = 1, 2 \quad (3-62)$$

$$g_3(\Gamma_i) = h_3(g_1(\Gamma_i)) \quad (3-63)$$

$$= Q\left(\frac{\sqrt{n}(0,3 - g_1(\Gamma_i))}{\sqrt{g_1(\Gamma_i)(1 - g_1(\Gamma_i))}}\right) - Q\left(\frac{\sqrt{n}(1 - g_1(\Gamma_i))}{\sqrt{g_1(\Gamma_i)(1 - g_1(\Gamma_i))}}\right), \quad i = 1, 2$$

$$g_4(\Gamma_i) = h_4(g_1(\Gamma_i)) \quad (3-64)$$

$$= \frac{\sqrt{ng_1(\Gamma_i)(1 - g_1(\Gamma_i))}}{n\sqrt{2\pi}[1 - g_3(\Gamma_i)]} \left[e^{-m_1^2(g_1(\Gamma_i))/2} - e^{-m_2^2(g_1(\Gamma_i))/2} \right] + \frac{g_1(\Gamma_i)}{1 - g_3(\Gamma_i)} [Q(m_1(g_1(\Gamma_i))) - Q(m_2(g_1(\Gamma_i)))] \quad , i = 1, 2 \quad (3-65)$$

Assim como feito na estimação dos parâmetros na presença de chuva, devido ao conhecimento parcial das FDPCs das diversas variáveis aleatórias, é utilizado o procedimento, apresentado no Apêndice B, que permite o cálculo de limitantes inferiores e superiores para estes parâmetros. São, então, definidos os seguintes limitantes para os parâmetros de desempenho de erro:

$$C_{reb}(g_1(\Gamma_1))g_1(\Gamma_1) + \int_{g_1(\Gamma_1)}^{g_1(\Gamma_2)} C_{reb}(R)dR \leq EBR \leq g_1(\Gamma_1) + \int_{g_1(\Gamma_1)}^{g_1(\Gamma_2)} C_{reb}(R)dR + C_{reb}(g_1(\Gamma_2))(1 - g_1(\Gamma_2)) \quad (3-66)$$

$$C_{res}(g_2(\Gamma_1))g_2(\Gamma_1) + \int_{g_2(\Gamma_1)}^{g_2(\Gamma_2)} C_{res}(R)dR \leq ESR \leq g_2(\Gamma_1) + \int_{g_2(\Gamma_1)}^{g_2(\Gamma_2)} C_{res}(R)dR + C_{res}(g_2(\Gamma_2))(1 - g_2(\Gamma_2)) \quad (3-67)$$

$$\begin{aligned}
C_{r_{ses}}(g_3(\Gamma_1))g_3(\Gamma_1) + \int_{g_3(\Gamma_1)}^{g_3(\Gamma_2)} C_{r_{ses}}(R)dR &\leq SESR \leq \\
g_3(\Gamma_1) + \int_{g_3(\Gamma_1)}^{g_3(\Gamma_2)} C_{r_{ses}}(R)dR + C_{r_{ses}}(g_3(\Gamma_2))(1 - g_3(\Gamma_2)) &\quad (3-68)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{r_{bbe}}(g_4(\Gamma_1))g_4(\Gamma_1) + \int_{g_4(\Gamma_1)}^{g_4(\Gamma_2)} C_{r_{bbe}}(R)dR &\leq BBER \leq \\
g_4(\Gamma_1) + \int_{g_4(\Gamma_1)}^{g_4(\Gamma_2)} C_{r_{bbe}}(R)dR + C_{r_{bbe}}(g_4(\Gamma_2))(1 - g_4(\Gamma_2)) &\quad (3-69)
\end{aligned}$$

Como observado por (3-66), (3-67), (3-68) e (3-69), os parâmetros de desempenho de erro, na presença de chuva e interferência externa, serão estimados como valores entre os respectivos limitantes.