Metodologia de Cálculo da BER e da Penalidade de Potência de um Pacote

Como vimos, o *laser* em anel implementado com o objetivo de controlar o ganho do EDFA tem freqüências naturais de oscilação que, se excitadas de forma ressonante pela variação dos sinais de entrada, resultam em grandes flutuações de ganho do amplificador e, conseqüentemente, em um aumento da BER média do canal de prova que pode chegar a mais de uma década, dependendo da eficiência da técnica de controle proposta⁴⁹.

Por conseguinte, ao propagar-se através do amplificador um pacote pode provocar flutuações de ganho que causam variações da potência de saída de outros pacotes em relação ao seu nível normal de detecção. Obviamente, esta variação da potência de saída resulta também em um aumento da BER destes outros pacotes.

Entretanto, não seria correto associar a BER de um pacote ao valor obtido através da medida da BER média. Isto porque o tamanho dos pacotes (5, 2,5 e 1,25 µs) é da ordem de 1 milhão de vezes menor do que o menor tempo de medida que podemos ajustar no equipamento de que dispomos para medir a taxa de erros (Anritsu MP1570A Sonet/SDH/PDH/ATM Analyzer), que é de 1 segundo. Assim, não se poderia avaliar a variação na BER provocada pelo tráfego dos pacotes porque ela seria mascarada pelo número de médias realizadas no decorrer do tempo de 1 segundo.

Mesmo que pudéssemos ajustar um tempo de medida menor, provavelmente encontraríamos outra dificuldade: realizar o sincronismo entre o Anritsu MP1570A, gerador do sinal PRBS contínuo sob a da taxa de *bits* escolhida, e os tempos de início e fim de um pacote do qual se quisesse saber o valor da BER.

⁴⁹ Ver figuras 15 e 17, páginas 79 e 81, respectivamente.

Estes tempos são definidos através do ajuste dos parâmetros dos geradores de pulsos elétricos mestre e escravos, estes últimos acoplados às fontes $laser^{50}$.

Para isso, seria necessário que o Anritsu MP1570A dispusesse de uma entrada adequada ao acoplamento do sinal de sincronismo (*trigger*) originário do gerador de pulsos elétricos. Após uma criteriosa leitura dos manuais, descobrimos que o referido equipamento não dispunha de tal entrada de sincronismo, informação esta que foi ratificada pelo representante do fabricante do equipamento no Brasil.

A partir desta necessidade, desenvolvemos uma metodologia de cálculo simples para quantificar a BER de um pacote no canal de prova e, por conseguinte, apresentamos uma forma alternativa de obter a penalidade de potência de um pacote.

Além disso, para que pudéssemos realizar uma avaliação segura da degradação da qualidade da informação transmitida no pacote quando este se propagasse através da rede óptica, verificamos a coerência dos valores assim obtidos para a penalidade de potência com os valores de penalidade de potência obtidos a partir de medidas da flutuação da potência de saída dos pacotes, realizadas com o emprego de um osciloscópio⁵¹.

7.1

Metodologia de Cálculo da BER Correspondente a um Pacote

Como não dispúnhamos de um equipamento capaz de medir a BER de um pacote, especificamente, desenvolvemos um método matemático para obtê-la. Basicamente, este método dissocia da BER média de um canal PRBS contínuo a taxa de erros correspondente à largura temporal de um pacote, ou seja, permite avaliar como o tráfego de pacotes afeta a BER média.

Para que pudéssemos encontrar a taxa de erros correspondente à largura temporal de um pacote, a qual chamamos B₁, foram necessárias duas medidas de BER: uma realizada com a propagação solitária do canal de prova, 1547 nm, com potência contínua através do circuito óptico, resultando na taxa de erros do

⁵⁰ Ver figura 25, página 98.

⁵¹ Ver apêndice A.7.

sistema não-perturbado, que chamamos B_2 ; outra obtida com a propagação simultânea do mesmo canal de prova com potência contínua e de pacotes no canal de 1532 nm, sendo a taxa resultante denominada B_m ou BER média. Por conseguinte, B_m pode ser escrita da seguinte forma:

$$B_m = B_1(DC) + B_2(1 - DC) \tag{7.1}$$

onde DC é o duty-cicle, o qual escrevemos convenientemente da seguinte forma:

$$DC = \frac{l_p}{t_{p-p}} \tag{7.2}$$

onde l_p é a largura do pacote (em nosso caso 5, 2,5 ou 1,25 µs) e t_{p-p} corresponde ao período de repetição dos pacotes ou, dito de outra forma, ao intervalo de tempo de chegada de dois pacotes consecutivos ao amplificador.

Considerando-se que o maior *duty-cicle* que medimos foi 5% para o pacote de 5 μ s com $t_{p-p} = 100 \mu$ s, é razoável realizar a seguinte aproximação:

$$1 - DC \approx 1 \tag{7.3}$$

e assim reescrever a eq. (7.1) para B₁ da seguinte forma:

$$B_1 = \frac{B_m - B_2}{DC}$$
(7.4)

A eq. (7.4) pode ser usada para encontrar a BER de 1 pacote de qualquer tamanho e em qualquer sistema de comunicação, desde que o *duty cicle* seja pequeno, idealmente menor do que 5%, para que a aproximação da eq. (7.3) seja válida.

Além disso, segundo a eq. (7.4), em B_1 está concentrada toda a perturbação da BER média causada pelo tráfego variável de pacotes na entrada do amplificador, já que B_2 é o resultado da medida de BER do sistema não-perturbado.

Entretanto, a análise da influência do tráfego de pacotes sobre a BER média do sistema através da eq. (7.4) passa a ser uma tarefa difícil quando nos afastamos do ponto de operação ótimo do sistema de controle de ganho, ou seja, para grandes atenuações no caminho de realimentação ou grandes perdas na cavidade.

Neste caso, as flutuações de ganho do sistema seriam tamanhas e B_2 tão grande que seria impossível dissociar da BER média B_m o acréscimo na taxa de erros causada pelo tráfego dos pacotes.

7.2

Forma Alternativa de Obter a Penalidade de Potência do Pacote

Observando rapidamente a eq. (7.4) percebemos que B_2 serve de referência e por isso ajustamos a potência na recepção para obter $B_2 = 1,2 \times 10^{-9}$. Poderíamos ter escolhido outro valor de referência para B_2 , bastando para isto ajustarmos a potência de recepção para outro valor.

Além disso, percebe-se também que o denominador da eq. (7.4) será sempre muito menor do que 1. Por isto e como esperado, B_1 representará sempre um acréscimo na taxa de erros média em relação a B_2 , ou seja, B_1 estará sempre associada a uma penalidade de potência em relação ao sistema não-perturbado. Esta penalidade reflete a perturbação do ganho do amplificador e, conseqüentemente, da potência de recepção no canal de prova, causada pela propagação de um ou mais pacotes, resultando em um aumento da BER média B_m .

Para encontrar esta penalidade de potência, além de B_1 , foi necessário obter também as curvas da BER média de referência, medidas com a propagação solitária do canal de prova com potência contínua em 1547 nm pelo circuito óptico, para cada um dos comprimentos de onda do sinal realimentado, 1528 e 1564 nm:



Figura 31 - Curva da BER média de referência, quando λ_{FBG} = 1528 nm.



Figura 32 - Curva da BER média de referência, quando λ_{FBG} = 1564 nm.

As curvas de BER média das figuras 31 e 32 foram ditas "de referência" porque a partir delas determinamos a penalidade de potência por década de variação da BER:

$$PP_{DEC} = P_{BER=10^{-9}} - P_{BER=10^{-8}}$$
(7.5)

onde PP_{DEC} é a penalidade de potência por década e $P_{BER = 10}^{-9}$ e $P_{BER = 10}^{-8}$ são as potências recebidas correspondentes à medida de cada uma das referidas taxas de erro. Esta década em especial foi escolhida não apenas em virtude do valor de B₂, mas também porque se situa na região aproximadamente linear de cada um dos gráficos, o que confere uma maior precisão aos cálculos.

Assim sendo, o exame da figura 31 permitiu-nos calcular a penalidade de potência por década de variação da curva de BER quando a rede de 1528 nm foi empregada:

$$PP_{DEC} = P_{BER=10^{-9}} - P_{BER=10^{-8}} = -19,379949 + 19,786058 = 0,406109$$
(7.6)

Da mesma forma, a partir da figura 32 calculamos a penalidade de potência por década de variação da curva de BER para o comprimento de onda de realimentação de 1564 nm:

$$PP_{DEC} = P_{BER=10^{-9}} - P_{BER=10^{-8}} = -19,528650 + 19,934428 = 0,405778$$
(7.7)

Após reunirmos todos estes parâmetros, calculamos a penalidade de potência de um pacote no canal de prova, PP_p , da seguinte forma:

$$PP_p = PP_{DEC} \log\left(\frac{B_1}{B_2}\right) \tag{7.8}$$

Comparação entre os Valores de Penalidade de Potência de um Pacote Obtidos a partir de Dois Métodos Distintos

O conhecimento da BER e da penalidade de potência permite realizar uma análise qualitativa da operação de um sistema óptico, pois indica a degradação da qualidade do sinal de cada pacote na medida em que ele se propaga através do sistema.

Para que possamos verificar a coerência da metodologia apresentada para obter a BER e a penalidade de potência de um pacote, independentemente de seu tamanho, comparamos os resultados encontrados com a penalidade de potência obtida diretamente da variação de pico-a-pico da potência de saída dos pacotes, a exemplo do cálculo realizado para encontrar as flutuações de ganho⁵².

Os valores da penalidade de potência correspondem a pacotes nãoarmazenados, mas que se propagaram uma única vez através do sistema da figura 39 do próximo capítulo.

Com o objetivo de possibilitar uma melhor comparação, apresentamos a seguir os dados referentes ao emprego de ambas as redes, 1528 e 1564 nm, para três tamanhos diferentes de pacotes ópticos que foram propagados no comprimento de onda do canal de prova, 1547 nm:

⁵² Ver apêndice A.7.



Figura 33 – Valores de penalidade de potência de pacotes de 1,25 µs em λ_{prova} = 1547 nm, quando λ_{FBG} =1528 nm.



Figura 34 - Valores de penalidade de potência de pacotes de 2,5 µs em λ_{prova} = 1547 nm, quando λ_{FBG} = 1528 nm.



Figura 35 - Valores de penalidade de potência de pacotes de 5 µs em λ_{prova} = 1547 nm, quando λ_{FBG} = 1528 nm.



Figura 36 - Valores de penalidade de potência de pacotes de 1,25 µs em λ_{prova} = 1547 nm, quando λ_{FBG} = 1564 nm.



Figura 37 - Valores de penalidade de potência de pacotes de 2,5 µs em λ_{prova} = 1547 nm, quando λ_{FBG} = 1564 nm.



Figura 38 - Valores de penalidade de potência de pacotes de 5 µs em λ_{prova} = 1547 nm, quando λ_{FBG} = 1564 nm.

Independentemente da rede de Bragg utilizada, ao observarmos e compararmos as figuras 33 a 38 anteriores, percebemos que os valores obtidos para a penalidade de potência com base em medidas da BER média (segundo a metodologia de cálculo apresentada neste capítulo) aproximam-se daqueles obtidos diretamente da variação de pico-a-pico da potência de saída dos pacotes. Além disso, a concordância é maior na medida em que aumenta o tamanho dos pacotes.

Esta tendência é bastante razoável: como o maior dos pacotes considerado é da ordem de um milhão de vezes menor do que o menor tempo de medida da BER média que é possível escolher no Anritsu MP1570A, 1 segundo, é de se supor que, quanto menores forem os pacotes e as penalidades, maior será o erro do método ao dissociar-se da BER média de um canal contínuo a taxa de erros correspondente à largura temporal de um pacote.

Entretanto, convém observar que, em qualquer das figuras anteriores, a maior divergência entre as penalidades medidas verifica-se nas situações em que o EDFA encontra-se muito aquém de seu melhor ponto de operação, ou seja, quando as depleções de ganho são pequenas.

Por outro lado, a concordância entre os métodos é praticamente prefeita para a maior das depleções de ganho medida em cada situação, que é exatamente o ponto ótimo de operação do EDFA que pôde ser alcançado com o emprego da técnica de controle de ganho proposta⁵³.

Esta ótima concordância verificada entre as penalidades medidas nos é muito oportuna, pois supre a falta de um equipamento capaz de medir a BER de pacotes armazenados na linha de atraso que implementamos.

Por conseguinte, passaremos então a atribuir as medidas de flutuação de ganho à penalidade de potência que seria medida após os pacotes terem sido armazenados por um determinado número de ciclos na linha de atraso. De fato, a magnitude das flutuações de ganho representa uma penalidade em virtude da oscilação da potência de saída dos pacotes em relação ao seu nível estável.

No próximo capítulo, avaliamos qualitativamente um sistema de armazenamento de pacotes por linha de atraso (*optical buffer*) e apresentamos os

120

⁵³ Os pontos ótimos correspondem a atenuações de 12 e 11 dB para os comprimentos de onda do sinal realimentado de 1528 e 1564 nm, respectivamente.

resultados comprobatórios da sua eficiência, alcançada através da otimização da técnica proposta para realizar o controle de ganho do EDFA.