

Utilização de modelos analíticos para quantificação de crosstalk em WSSs

Daniel Alves Ribeiro Chaves 1

Escola Politécnica de Pernambuco
Universidade de Pernambuco
50.720-001 - Recife, Brasil
darc@ecomp.poli.br

Hartur Barreto Brito

Escola Politécnica de Pernambuco
Universidade de Pernambuco
50.720-001 - Recife, Brasil
hbb@ecomp.poli.br

Autor 3

Escola Politécnica de Pernambuco
Universidade de Pernambuco
50.720-001 - Recife, Brasil
Autor2@meu-email

Resumo *Este projeto visa estudar o efeito da interferência de crosstalk em comutadores ópticos (WSSs e OXCs) utilizando modelagem analítica e simulações monte carlo e desenvolver um programa para que esses modelos possam ser utilizados no simulador SIMTON, ajudando na análise de resultados obtidos pelo simulador.*

Abstract *This project tries to study the effect of the interference and crosstalk in optical switches (WSSs and OXCs) using analytical models and monte carlo simulation and develop a program that use these models to implement at the simulator SIMTON, helping the analysis of the results.*

1 Introdução

A disseminação da internet tem facilitado o surgimento de vários serviços de comunicação so_sticados.

A utilização de meios desses meios comunicação, como vídeo sob demanda, voz sobre IP e redes sociais, tem se tornado cada vez mais frequente. Esses serviços demandam a troca de grande quantidade de informações à elevadas taxas de transmissão. Para suportar esses serviços a infra-estrutura de telecomunicações deve se adequar a essa requisição. Atualmente, a tecnologia que melhor atende a esses requisitos é o sistema de comunicações ópticas interligados em rede (redes ópticas). Os sistemas ópticos atuais utilizam principalmente o sistema de multiplexação por divisão de comprimento de onda ou WDM. O WDM viabiliza a transmissão simultânea de diversos _uxos informações diferentes (e.g. de usuários diferentes da rede) em uma mesma _bra óptica. Cada _uxo de informação é transmitido utilizando um comprimento de onda diferente.

As redes ópticas podem ser classi_cadas em: opaca, transparente e translúcida. Nas opacas, o sinal é convertido do domínio óptico para o eletrônico e novamente para o óptico (conversão O-E-O) em todos os nós da rede. Essa conversão permite a regeneração de todos os sinais que estão trafegando na rede resultando em um bom desempenho da mesma. Por outro lado seu custo de implementação é elevado, pois um grande número de dispositivos que realizam O-E-O é necessário. Nas redes transparentes não são empregadas interfaces O-E-O reduzindo seu custo de implantação. Porém, como não são realizadas O-E-O, há acúmulo de degradação do sinal óptico imposto pela camada física o que leva a uma perda de desempenho signi_cativa em relação às redes opacas. As redes translúcidas são redes transparentes que possuem interfaces O-E-O (também chamadas aqui de regeneradores) estrategicamente posicionadas na rede. A rede translúcida é uma solução intermediária que procura aliar o bom desempenho da rede opaca com o baixo custo da transparente.

A utilização de uma topologia em malha. Na topologia em malha, cada nó da rede óptica pode se conectar a diversos outros nós da rede. Ou seja, um nó com essa característica possui N portas de entrada e N portas de saída. Ele deve ser capaz de comutar qualquer comprimento de onda em uma porta de entrada para qualquer porta de saída. O dispositivo que implementa essa funcionalidade é chamado na literatura de OXC (optical cross connect).

O dispositivo óptico utilizado atualmente em redes que viabiliza a construção de OXCs é o WSS (Wavelength Selective Switch). O WSS pode ser um dispositivo com uma entrada e múltiplas saídas (1xN), ou um dispositivo com

muitas entradas e uma única saída (Nx1). O WSS pode escolher, de forma independente, quais comprimento de onda presentes em uma entrada serão transmitidos para a saída do dispositivo. As topologias de ligação mais utilizadas para se formar um OXC com WSSs são as estruturas broadcast and select (BS) e a select and select (SS). A BS apresenta um menor custo porém, em geral, introduz uma maior degradação ao sinal em comparação ao SS.

Ao ser comutado no WSS o sinal óptico pode ser degradado. Isso porque, devido a não idealidade do dispositivo, comprimentos de ondas que transportam informação diferentes podem interferir entre si no interior do WSS gerando uma penalidade conhecida como crosstalk. Nesse caso, a relação sinal ruído (relação que indica o quanto a intensidade de sinal é maior que a intensidade de ruído) do sinal comutado no WSS sofre uma redução pelo aumento da parcela de ruído gerado por crosstalk no interior do WSS.

Tipicamente um sinal óptico é comutado em vários nós no seu percurso. Se a cada nó de comutação há acúmulo da penalidade de crosstalk, ela pode impactar o sinal que está sendo transmitido a ponto de inviabilizar sua recepção.

2 Formulação geral para WSS Nx1

2.1 Premissas

O WSS considerado é mostrado na Figure 1. Ele tem N portas de entrada e 1 de saída. Há K slots de frequência diferentes permitidos em cada porta de entrada/saída. Cada slot de frequência tem um comprimento de onda permitido de Δw e frequências centrais $w_1, w_2; \dots, w_K$. A frequência é representada pela variável independente w .

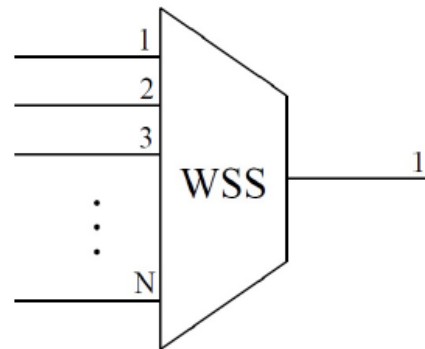


Figura 1: WSS Nx1

A matriz de comutação $\underline{A} = \{a_{n,k}\}$ do WSS pode ser definida como:

$$a_{n,k} = \begin{cases} 1, & \text{Se o } k\text{-th slot de frequência na } n\text{-th} \\ & \text{porta de entrada for comutada para} \\ & \text{a saída.} \\ 0, & \text{Caso contrário.} \end{cases} \quad (1)$$

Considerando $g_n(w)$ como função transferência entre a n -th entrada do WSS e sua saída. O vetor de transferência pode ser descrito como $\underline{\mathbf{G}}(w) = [g_1(w), \dots, g_n(w)]^t$ composto por N funções transferência.

Suponha que na n -ésima porta de entrada do WSS exista um sinal $s_n(w)$ (que pode ser ou não um sinal com interferência) e um sinal adicional de ruído $r_n(w)$ (que pode ser gerado por diversas fontes, incluindo ruído ASE ou interferência de crosstalk). Além disso, assuma que o sinal total na n -ésima porta de entrada do WSS pode ser escrita por $s_n(w) + r_n(w)$.

2.2 Cálculo do sinal sem interferência na saída

Algumas partes do spectrum $s_n(w)$ são comutadas para a saída do WSS e outras são bloqueadas. Uma forma de escrever o sinal $s'_n(w)$ composto apenas pelas partes do spectrum $s_n(w)$ que são comutadas para a saída do WSS é:

$$s'_n(w) = s_n(w) \sum_{k=1}^K a_{n,k} \pi(w - w_k) \quad (2)$$

Sendo a função $\pi(w)$ é definida por:

$$\pi(w) = \begin{cases} 1, & \text{se } |w| < \frac{\Delta w}{2} \\ 0, & \text{Caso contrário.} \end{cases} \quad (3)$$

Definindo $\underline{\boldsymbol{\pi}}(w) = [\pi(w - w_1), \dots, \pi(w - w_k)]^t$, e $\underline{\mathbf{S}}' = [s'_1(w), \dots, s'_N(w)]^T$ pode-se escrever (2) na forma de matriz como:

$$\underline{\mathbf{S}}'(w) = (\underline{\mathbf{A}} \cdot \underline{\boldsymbol{\pi}}(w)) \otimes \underline{\mathbf{S}}(w) \quad (4)$$

Sendo a representação do produto de matrizes de Hadamard. Dadas duas matrizes $\underline{\mathbf{A}} = \{a_{i,j}\}$ e $\underline{\mathbf{B}} = \{b_{i,j}\}$ o produto de Hadamard retorna a matriz $\underline{\mathbf{C}} = \{c_{i,j}\}$ considerando que $c_{i,j} = a_{i,j} b_{i,j}$.

O crosstalk em um WSS é gerado pela imperfeição no bloqueio do spectrum de frequência que não deveria ser comutado do n -th porta de entrada para a porta de saída. Observe que $s'_n(w)$ contém uma porção do spectrum de frequência que é comutado da entrada para saída e não sofre nenhum bloqueio. Assim, o sinal na saída que não recebe interferência de $r'_n(w)$ nem do crosstalk gerado pelo WSS pode ser calculado como:

$$y^S(w) = \sum_{n=1}^N g_n(w) s'_n(w) \quad (5)$$

Ou em notação de matriz:

$$y^S(w) = \underline{\mathbf{G}}^T(w) \cdot \underline{\mathbf{S}}'(w) = \underline{\mathbf{G}}^T(w) \cdot [(\underline{\mathbf{A}} \cdot \underline{\boldsymbol{\pi}}(w)) \otimes \underline{\mathbf{S}}(w)] \quad (6)$$

2.3 Cálculo do sinal com interferência na saída

O sinal total na entrada (sinal mais sinal de ruído) é $s_n(w) + r_n(w)$. Assim, o sinal de saída com interferência gerada pelo crosstalk do WSS e ruído das portas de entrada podem ser calculadas por:

$$y^{total}(w) = \sum_{n=1}^N g_n(w) [s_n(w) + r_n(w)] \quad (7)$$

Que pode ser escrito na notação de matriz como:

$$y^{total}(w) = \underline{\mathbf{G}}^T(w) \cdot [\underline{\mathbf{S}}(w) + \underline{\mathbf{R}}(w)] \quad (8)$$

Sendo $\underline{\mathbf{R}}(w) = [r_1(w), \dots, r_N(w)]^T$.

2.4 Ruído saída e interferência de crosstalk total

Como foi descrito anteriormente $y^{total}(w)$ e $y^S(w)$ são, respectivamente, o sinal com interferência e sem interferência de ruído e crosstalk. Portanto, o total de ruído e interferência de crosstalk $y^I(w)$ verificado na saída do WSS pode ser calculada como:

$$y^I(w) = y^{total}(w) - y^S(w) \quad (9)$$

Assim,

$$y^I(w) = \underline{\mathbf{G}}^T(w) [\underline{\mathbf{S}}(w) + \underline{\mathbf{R}}(w) - (\underline{\mathbf{A}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes \underline{\mathbf{S}}(w)] \quad (10)$$

Resumindo:

$y^S(w) = \underline{\mathbf{G}}^T(w) \cdot [(\underline{\mathbf{A}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes \underline{\mathbf{S}}(w)].$	(Signal)
$y^I(w) = \underline{\mathbf{G}}^T(w) \cdot [\underline{\mathbf{S}}(w) + \underline{\mathbf{R}}(w) - (\underline{\mathbf{A}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes \underline{\mathbf{S}}(w)]$	(Noise and Xtalk)

(11)

3 Formulação Geral para WSS

3.1 Premissas

O WSS considerado está representado na Figure 2. O WSS considerado tem 1 porta de entrada e N portas de saída. Há K slots de frequência permitidos em cada porta de entrada/saída. Cada slot de frequência tem um comprimento de onda permitido de Δw e frequências centrais de $w_1; w_2; \dots; w_k$. A frequência é representada pela variável independente w

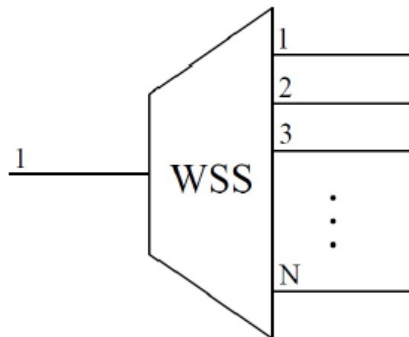


Figura 2: WSS N1xN

A matriz de comutação do WSS $\underline{\mathbf{B}} = \{b_{n,k}\}$ é definida por:

Considere $f_n(w)$ como sendo função transferência entre a entrada e a n -th saída do WSS. O vetor de transferência pode ser descrito como $\underline{\mathbf{F}}(w) = [f_1(w), \dots, f_N(w)]^T$ composto por N funções-transferência.

Suponha que na porta de entrada do WSS há um sinal principal $s(w)$ (que pode ou não conter interferência) e um sinal adicional de ruído $r(w)$ (que pode ser oriundo de diferentes fontes incluindo ruído ASE ou interferência por crosstalk). Além disso, assuma que o sinal total da porta de entrada do WSS pode ser escrito como $s(w) + r(w)$.

3.2 Cálculo do sinal sem interferência na saída

Algumas partes do spectrum $s(w)$ são comutadas para a saída do WSS e a outras são bloqueadas. Uma forma de escrever o sinal $s'_n(w)$ composto apenas pelas partes do spectrum $s(w)$ que são comutadas para n -th saída do WSS é:

$$s'_n(w) = s(w) \sum_{k=1}^K b_{n,k} \pi(w - w_k) \quad (13)$$

Sendo a função $\pi(w)$ definida por (3). Definindo $\underline{\mathbf{\Pi}}(w) = [\pi(w - w_1), \dots, \pi(w - w_K)]^T$ e $\underline{\mathbf{S}}'(w) = [s'_1(w), \dots, s'_N(w)]^T$ pode-se escrever (13) utilizando notação de matriz como:

$$\underline{\mathbf{S}}'(w) = [\underline{\mathbf{B}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)] s(w) \quad (14)$$

O crosstalk em um WSS é gerado pela imperfeição no bloqueio do spectrum de frequência que não deveria ser comutado da porta de entrada para a n -th porta de saída. Observe que $s'_n(w)$ contém uma porção do spectrum de frequência que é comutado da entrada para a n -th saída e não sofre nenhum bloqueio. Assim, o sinal $y_n^S(w)$ na n -th porta de saída que não recebe interferência de $r(w)$ nem do crosstalk gerado pelo WSS pode ser calculado como:

$$y_n^S(w) = f_n(w) s'_n(w) \quad (15)$$

Definindo $\underline{\mathbf{Y}}^S(w) = [y_1^S(w), \dots, y_N^S(w)]^T$ pode-se escrever (15) em notação de matriz como:

$$\underline{\mathbf{Y}}^S(w) = \underline{\mathbf{F}}(w) \otimes \underline{\mathbf{S}}'(w) = s(w) \underline{\mathbf{F}}(w) \otimes [(\underline{\mathbf{B}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w))] \quad (16)$$

Note que $s(w)$ é um escalar. Então pode ser colocado à esquerda da equação.

3.3 Cálculo da interferência do sinal na saída

O sinal total de entrada (sinal mais ruído) é dado por $s(w) + r(w)$. Assim, o sinal de interferência gerada pelo crosstalk do WSS e o sinal de ruído da porta de entrada do WSS pode ser calculado por:

$$y_n^{total}(w) = [s(w) + r(w)] f_n(w) \quad (17)$$

Que pode ser escrito na notação de matriz como:

$$\underline{\mathbf{Y}}^{total}(w) = \underline{\mathbf{F}}(w)[s(w) + r(w)] \quad (18)$$

Sendo $\underline{\mathbf{Y}}^{total}(w) = [y_1^{total}(w), \dots, y_N^{total}(w)]^T$.

3.4 Total de ruído na saída e interferência de crosstalk

Como foi discutido, $y_n^{total}(w)$ e $y_n^s(w)$ são, respectivamente, os sinais da n -th porta de saída com e sem interferência gerada pelo ruído e crosstalk $y_n^I(w)$ verificada na n -th porta de saída do WSS pode ser calculada por:

$$y_n^I(w) = y_n^{total}(w) - y_n^s(w) \quad (19)$$

Que pode ser escrita em notação de matriz como:

$$\underline{\mathbf{Y}}^I(w) = \underline{\mathbf{Y}}^{total}(w) - \underline{\mathbf{Y}}^s(w) = \underline{\mathbf{F}}(w)[s(w) + r(w)] - s(w) \quad (20)$$

Que pode ser reescrita como:

$$\underline{\mathbf{Y}}^I(w) = s(w)[\underline{\mathbf{F}}(w) - \underline{\mathbf{F}}(w) \otimes (\underline{\mathbf{B}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w))] + r(w) \underline{\mathbf{F}}(w) \quad (21)$$

Resumindo:

$\underline{\mathbf{Y}}^S(w) = s(w) \underline{\mathbf{F}}(w) \otimes [(\underline{\mathbf{B}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w))]$	(Signal)
$\underline{\mathbf{Y}}^I(w) = s(w) \underline{\mathbf{F}}(w) - \underline{\mathbf{F}}(w) \otimes (\underline{\mathbf{B}} \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) + r(w) \underline{\mathbf{F}}(w)$	(Noise and Xtalk)

(22)

4 Formulação para arquitetura de nó broadcast and select

4.1 Premissas

Nesta seção serão aplicados os resultados obtidos em (11) para estabelecer o modelo analítico para o nó com arquitetura broadcast and select. Essa arquitetura é mostrada na Figure 3. No nó há N fibras de entrada são indexadas com i enquanto as fibras de saída são indexadas com j .

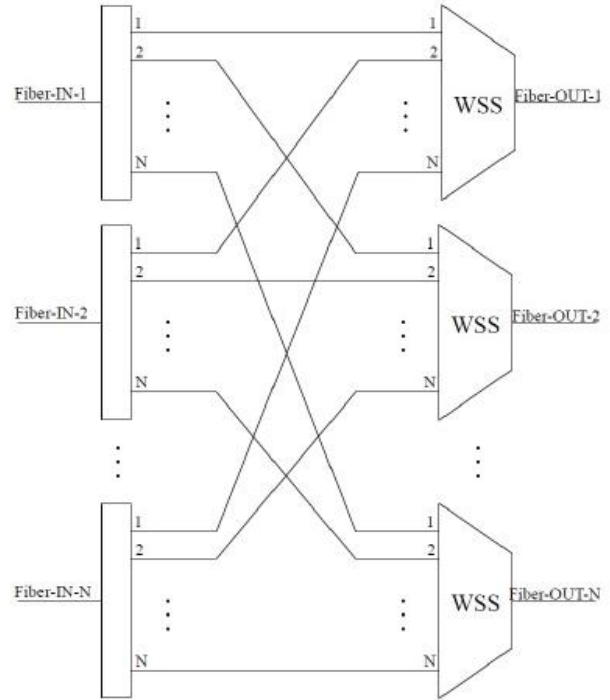


Figura 3: Arquitetura de nó broadcast and select

Suponha que, na i -th fibra da porta de entrada, há um sinal principal $s_i^{fbr}(w)$ (que pode ou não ser um sinal principal com interferência) e um sinal adicional de ruído $r_i^{fbr}(w)$ (que pode incluir várias fontes diferentes como o ruído ASE ou interferência de crosstalk). Além disso, assumamos que o sinal total na i -th porta de entrada pode ser escrita como $s_i^{fbr}(w) + r_i^{fbr}(w)$. Considere que o splitter localizado na i -th fibra de entrada tem uma perda de l_i^{sp} .

4.2 Formulação

O sinal $y_j^S(w)$ na j -th saída do WSS pode ser descrito em função de um vetor de transferência $\underline{\mathbf{G}}_j^T(w)$, uma matriz de comutação $\underline{\mathbf{A}}_j$, um vetor de perdas $\underline{\mathbf{L}}^{sp}$ e um vetor de sinais $\underline{\mathbf{S}}^{fbr}$ da seguinte forma:

$$y_j^S(w) = \frac{1}{N} \underline{\mathbf{G}}_j^T(w) \cdot \left\{ [\underline{\mathbf{A}}_j \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)] \otimes [\underline{\mathbf{L}}^{sp} \otimes \underline{\mathbf{S}}^{fbr}] \right\} \quad (23)$$

O ruído e o crosstalk podem ser descritos em função da quantidade N de portas do WSS, uma matriz de comutação $\underline{\mathbf{A}}_j$, um vetor de perdas $\underline{\mathbf{L}}^{sp}$ e o vetor de ruído adicional $\underline{\mathbf{R}}^{fbr}$ da seguinte forma:

$$y_j^i(w) = \frac{1}{N} \underline{\mathbf{G}}_j^T(w) \cdot \left[\underline{\mathbf{L}}^{sp} \otimes \underline{\mathbf{S}}^{fbr} + \underline{\mathbf{L}}^{sp} \otimes \underline{\mathbf{R}}^{fbr} - (\underline{\mathbf{A}}_j \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes (\underline{\mathbf{L}}^{sp} \otimes \underline{\mathbf{S}}^{fbr}) \right] \quad (24)$$

5 Formulação para arquitetura de nó switch and select

Nesta seção serão aplicados os resultados obtidos em (11) e (22) para estabelecer o modelo analítico para o nó com arquitetura switch and select. Essa arquitetura é mostrada na Figure 3. No nó há N_{bras} de entrada e N_{bras} de saída. As bras de entrada são indexadas com i enquanto as de saída são indexadas com j .

Pode-se calcular o sinal do j -th WSS $N \times 1$ em função de uma matriz de comutação $\underline{\mathbf{A}}_j$ e pelas matrizes $\underline{\mathbf{M}}^T$ e $\underline{\mathbf{C}}^T$ que podem ser calculadas, respectivamente, por $\underline{\mathbf{M}}^T \cdot \underline{\mathbf{E}}_j$ e $\underline{\mathbf{C}}^T \cdot \underline{\mathbf{E}}_j$, como:

$$y_j^S(w) = \underline{\mathbf{G}}_j^T(w) \left[(\underline{\mathbf{A}}_j \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes (\underline{\mathbf{M}}^T \cdot \underline{\mathbf{E}}_j) \right] \quad (25)$$

E a interferência pode ser calculada como:

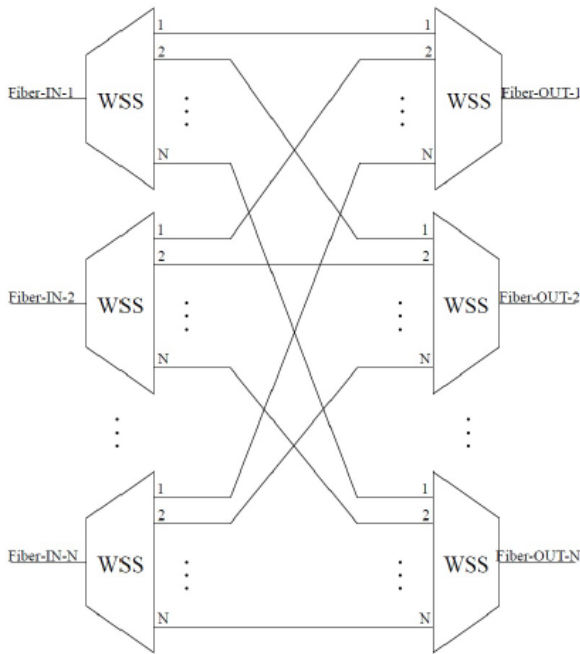


Figura 4: Arquitetura de nó switch and select

$$y_j^S(w) = \underline{\mathbf{G}}_j^T(w) \left[\underline{\mathbf{M}}^T \cdot \underline{\mathbf{E}}_j + \underline{\mathbf{C}}^T \cdot \underline{\mathbf{E}}_j - (\underline{\mathbf{A}}_j \cdot \underline{\mathbf{\Pi}}(w)) \otimes (\underline{\mathbf{M}}^T \cdot \underline{\mathbf{E}}_j) \right] \quad (26)$$

6 Implementação da Modelagem

Esta seção irá comentar a respeito do programa desenvolvido para ser utilizado em simulações.

6.1 Premissas

Para representação dos valores foram utilizados tabelas csv. Entre elas algumas devem ser preenchidas antes da execução do programa, são elas: Tabela com sianis de entrada dos WSSs, tabelas referentes 6 às funções transferência do primeiro e segundo layer e tabela referente a topologia do nó.

A partir dessas tabelas o programa é capaz de calcular os sianis de saída do layer 1 e alocar, de acordo com a topologia, como sinal de entrada do layer 2 para que possa ser calculado o sinal de saída do layer 2.

Com esses resultados é possível retirar informações sobre o ruído de acordo com a modelagem demonstrada nas seções anteriores.