

Conversão de Comprimento de Onda Baseado em Four Wave Mixing

Francisco A. S. Couto, Rogério N. Nogueira, Paulo S. André, António L. Teixeira

Resumo - A conversão de comprimento de onda totalmente óptico é um dos desafios importantes nas redes ópticas actuais. Permite eliminar os problemas inerentes à conversão eléctrica, tais como o ruído térmico; a sua transparência ao formato do sinal e à taxa de transmissão, fazem com que este tipo de conversão sejam cada vez mais estudadas e testadas.

A Mistura de Quatro Ondas (FWM) é uma técnica de conversão onde não são necessários os elementos eléctricos. O cálculo teórico da eficiência em função dos vários parâmetros dos quais a conversão depende dá-nos uma ideia de como devemos otimizar um sistema de FWM para obter a melhor eficiência de conversão numa fibra DSF. Neste trabalho apresenta-se a formulação e estuda-se este fenómeno variando os seus parâmetros principais.

Abstract - All-optical wavelength conversion is one of the major research topics in the optical networks area. Problems due to electrical conversion can be easily eliminated, such as thermal noise; its transparency to the shape of the signal and to the bit rate, makes this type of conversion an attractive solution.

The 'Four Wave Mixing' (FWM) process is one of these all-optical techniques. Theoretical calculation of efficiency as a function of the various parameters involved on the conversion, give us one idea how to optimize a FWM system and to achieve the best efficiency of conversion, in a DSF fiber. In this work we present the formulation and study the phenomena as a function of its main parameters.

I. INTRODUÇÃO

O efeito de FWM consiste em três sinais (ondas) com frequências diferentes, os quais vão interagir entre si e gerar novos sinais obedecendo à expressão seguinte :

$$W_{ijk} = W_i + W_j - W_k$$

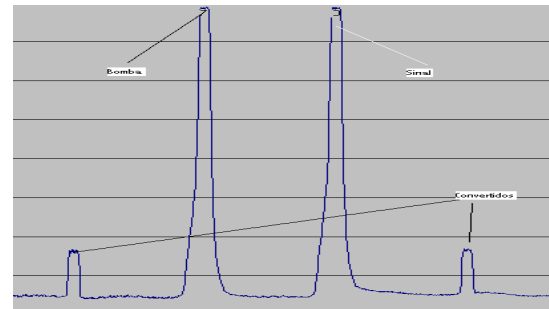


FIGURA 1. Dois feixes fs e fp e os sinais gerados

Se dois feixes f_s e f_p , com comprimentos de onda diferentes, forem recombinados e introduzidos num material não linear; devido à não linearidade do meio vão ser gerados novos sinais às frequências $2f_p - f_s$ e $2f_s - f_p$, como se pode observar na figura 1.

Neste fenómeno há troca de energia entre os sinais de entrada e os convertidos. O FWM é um efeito não linear coerente, permitindo, desta forma, utilizar qualquer formato de modulação. A fase e a amplitude são preservadas durante o processo de conversão o que torna este processo extremamente atraente. Os conversores baseados em FWM podem operar a altos ritmos sem haver degradação significativa da razão de extinção (relação entre os níveis do 0 e do 1).

A propagação de ondas electromagnéticas pode ser modelizada recorrendo às equações de Maxwell's [1] expressas como:

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \cdot D = \rho$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

onde ρ é a densidade de carga e J é densidade de corrente.

A solução das equações para ondas a propagarem-se numa fibra foram derivadas por Schrodinger e é dada por [16]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A \quad (1)$$

Na dedução da eficiência do FWM, considera-se um sinal WDM que é a soma de múltiplas ondas monocromáticas. O campo eléctrico, num dieléctrico, deste sinal, pode ser expresso por [4]:

$$E(r,t) = \sum E_i \cdot \cos(\omega_i t - \beta_i z) \quad (2)$$

A polarização não linear num dieléctrico é dada por[16]:

$$P_{NL}(r,t) = \varepsilon_0 \chi^{(3)} E^3(r,t) \quad (3)$$

onde $\chi^{(3)}$ é a susceptibilidade não linear de terceira ordem, que é baixa na sílica, mas devido à intensidade dos campo no núcleo, vai interagir e gerar FWM.

Da expressão (3) temos para o caso do FWM, a potência dos sinais gerados pode ser aproximada por [5]

$$P_{ijk} = \eta_{ijk} \cdot \left(\frac{32\pi^3 \chi^{(3)} L_{ef} d_{ijk}}{(n_o)^2 c A_{ef} \lambda} \right)^2 \cdot e^{-\alpha L} \cdot P_i P_j P_k \quad (4)$$

sendo η_{ijk} a eficiência do FWM, α o coeficiente de atenuação da fibra, L o comprimento efectivo da fibra e os P's as respectivas potências às frequências i,j e k .

Integrando a solução da equação paraxial para um canal WDM, a expressão da eficiência é [3]:

$$\eta_{ijk} = \left| \frac{1 - e^{-(\alpha - i\Delta\beta)L}}{L_{ef} \cdot (\alpha - i\Delta\beta)} \right|^2 \quad (5)$$

$\Delta\beta$ a desadaptação de fase é [8]

$$\Delta\beta = \beta(f_i) + \beta(f_j) - \beta(f_k) - \beta(f_{ger})$$

substituindo L_{ef} que depende da atenuação e do comprimento da fibra temos [3]

$$L_{ef} = \frac{(1 - e^{-\alpha L})}{\alpha^2} \quad (6)$$

e a eficiência do FWM toma a forma mais simples [4]:

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left[1 + \frac{4e^{-L} \sin^2\left(\frac{1}{2}\Delta\beta L\right)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right] \quad (7)$$

A eficiência é uma relação entre a potência dos sinais gerados e a potência de fs (sinal), expressa pela expressão

$$\eta = \frac{P_{ger}}{P_s} \quad (8)$$

Com base na expressão da eficiência de FWM, fez-se uma análise teórica da importância dos vários parâmetros na optimização de um sistema de conversão FWM. Esta

equação (7) tem uma variação sinusoidal com amplitude decrescente. Daí para estudarmos o processo, observámos o comportamento desta função tendo em conta o ponto onde esta é máxima, pois é a zona onde pretendemos trabalhar pois é a zona onde a eficiência deste processo será máxima.

A desadaptação de fase ($\Delta\beta$), ou condição de fase, depende de vários factores, tais como a separação entre as frequências (Δf), a dispersão cromática D, o declive da

curva $\frac{dD}{d\lambda}$ e o comprimento de onda do sinal λ_s , podendo ser expressa por [3]:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda_s^2}{c} \Delta f^2 \cdot (D + \Delta f \frac{\lambda_s^2}{c} \frac{dD}{d\lambda}) - \gamma(P_p - P_s) \left(\frac{1 - e^{-\alpha L_{ef}}}{\alpha L_{ef}} \right) \quad (9)$$

o segundo membro da equação corresponde à dependência do $\Delta\beta$ com a intensidade. Como tal este factor varia ao longo da fibra devido às perdas desta. No entanto, este pode ser desprezado, pois, na prática, os sinais envolvidos têm potências reduzidas.

Na desadaptação de fase, eq. (9), para um comprimento de onda longe do zero de dispersão, a contribuição da derivada da dispersão é desprezada, porque D (dispersão) torna-se dominante. A equação (3) é novamente reescrita e toma a forma [7]:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda_s^2}{c} \Delta f^2 \cdot D \quad (10)$$

II. RESULTADOS NUMÉRICOS

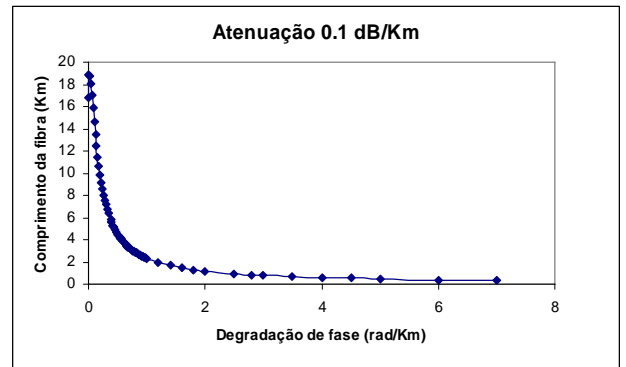


Figura 2. Comprimento óptimo da fibra para obter eficiência máxima de FWM em função da degradação de fase

A fig.2 mostra a dependência do máximo de eficiência com a degradação de fase e o comprimento óptimo da fibra. Conforme se vê na fig.2, a eficiência máxima para pequenos valores de degradação de fase, ocorre para grandes comprimentos óptimos da fibra. Tal deve-se ao facto das ondas se manterem em fase por um longo espaço condição necessária à ocorrência deste processo de FWM.

Para degradações de fase elevadas, a máxima eficiência de FWM ocorre mais cedo. Isso deve-se ao facto das

ondas estarem pouco espaço em condição de paridade de fase

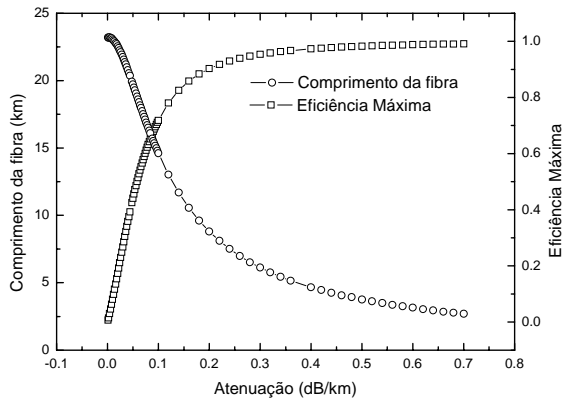


Figura 3. Comprimento óptimo da fibra para obter a eficiência máxima para uma dada atenuação e desadaptação de fase constantes 0.1 rad/Km

Seguidamente, fez-se o mesmo estudo tendo como parâmetro a atenuação. Os resultados apresentam-se na fig.3, onde a atenuação tem um papel bastante importante na eficiência do FWM. Pode-se observar que o comprimento óptimo da fibra é maior para baixas atenuações. Para atenuações elevadas a eficiência é superior, mas a potência dos sinais gerados, é inversamente proporcional à atenuação como se constata na equação (4).

Com expressão (10), obtiveram-se os seguintes gráficos que nos permitem analisar a importância da separação de frequências no processo de FWM, para uma dispersão de 1.7 ps/(nm/Km) em 1570nm.

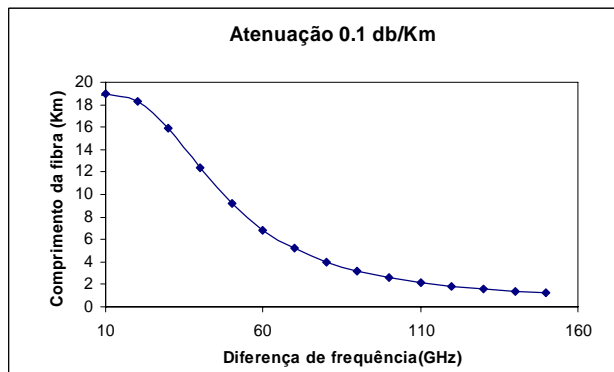


Figura 4. Comprimento óptimo da fibra para obter a eficiência máxima para uma dada diferença de frequências

Para uma atenuação de 0,1 dB/Km, o comprimento da fibra óptimo varia com a diferença de fase. Neste caso, o FWM tem um máximo de eficiência a 19 Km, para uma separação entre frequências de 10 GHz. Mas como se observa na fig.5, a eficiência decresce à medida que se aumenta a separação entre frequências devido uma vez mais ao crescente resultante desfasamento entre as ondas envolvidas.

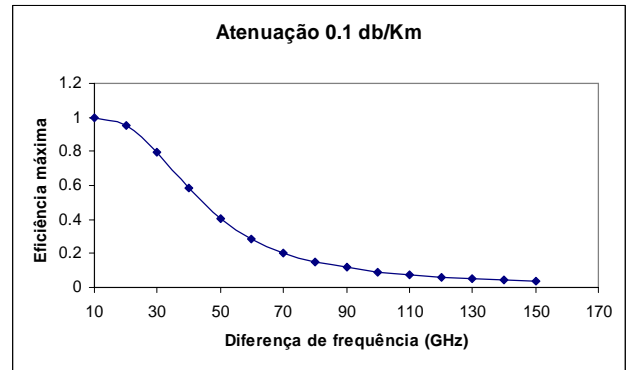


Figura 5. Eficiência máxima em função da diferença de frequência

III. CONCLUSÃO

Neste trabalho desenvolvemos e mostramos as formulações que regem os processos de Four Wave Mixing em fibras DSF. Este processo foi estudado tendo em consideração os seus parâmetros principais tendo sido obtidos gráficos de dimensionamento do fenómeno. Podemos concluir que quer a degradação de fase quer a atenuação são factores preponderantes neste tipo de fenómeno, pois afectam por si os pontos de operação óptimos, e também indirectamente através do desvio de frequência que é inerente aos diferentes sinais

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao projeto Wo-Net (POSI/CPS/40009/2001) aprovado pela FCT e pelo POSI, com a participação do FEDER.

REFERÊNCIAS

- [1] António Teixeira, "Apontamentos de Sistemas de Comunicações Ópticas", 2003
- [2] Gerd Keiser, "Optical Fiber Communication", McGraw-Hill
- [3] Govind Agrawal, "Nonlinear fiber optics", 2001
- [4] Raji Ramaswami, "Optical Networks", Morgan Kaufman, 2002
- [5] Goran Einarsson, "Lightwave Communications", Wiley, 2001
- [6] Ines Brunn, "DWDM Pocket Guide", Alterna, 2003
- [7] Jang, Chung, "Four Wave Mixing of incoherent light in a dispersion shifted Using a Spectrum Sliced Fiber Amplifier Light Source", IEEE, 1998
- [8] Kyo Inoue, "Four Wave Mixing in an Optical Fiber in the Zero-Dispersion Wavelength Region", Journal of Lightwave Technology, Vol.10, Nº11, November 1992
- [9] Peter Ohlen, Bengt-Erik, "Wavelength Dependence and power requirements of a wavelength converter based on XPM in dispersion shifted Optical Fiber", IEEE, 2000
- [10] Wei Wang, Poulsen, "Regenerative 80 Gb/s fiber XPM wavelength converter using a Raman/EDFA Gain Enhanced Configuration, IEEE, 2003

- [11] Bell Labs, Lucent , “All-optical wavelength conversion up to 100Gbit/s with SOA delayed-interference configuration, IEEE, 2000
- [12] Ross, Justin Blows, “ Wavelength conversion bandwidth in fiber based optical parametric amplifiers”, Optical Express, 2003
- [13] Liu, Hill, de Waardt, “Wavelength Conversion using nonlinear polarization rotation in a single semiconductor optical amplifier”, IEEE,2003
- [14] Jang, Lee, “ Effects of Crosstalk in WDM Systems Using Spectrum Sliced Ligth Source” , IEEE, 1999
- [15] Jesper Mork, Svend Bischoff, “Ultrafast optical signal processing in semiconductor optical amplifier, 2002
- [16] Agrawal Govind, “Applications in nonlinear fiber optics”, 2001
- [17] Grosz, Fragnito, “Four wave mixing interactions in the anomalous propagation regime in WDM optical communications Systems, 1997