

6Referências bibliográficas

[1] B. Mikkelsen, C. Rasmussen, Deployment of 40 Gb/s systems: Technical and cost issues, White Paper Mintera, USA Mar2004

[2] Abreu M. Fernanda, *Multiplexação óptica no domínio do tempo em sistemas STM-16, STM-64 e STM-256*, Dissertação de mestrado, CETUC, Pontifícia Universidade Católica-RJ, Rio de Janeiro, 2001.

[3] Carvalho R.M.C, *1 ps Pulse Generation From a Harmonically Mode-Locked Erbium-Doped Fiber Ring Laser And Its Application to Optical Communication Systems.*, Microwave and Optical Technology Letters, vol24 No5, Mar 2000.

[4] Tsukada M. , Zhong W. , *An Ultrafast Photonic ATM switch Based on Bit-Interleave multiplexing*, Journal of Lightwave Technology, vol14 No 9, Sep 1996

[5] Takara H., *High Speed Optical Time-Division Multiplexed Signal Generation*, CLEO 2000, High Speed Communication session.

[6] G.P. Agrawal, *Fiber Optic Communication Systems*, San Diego: Academic, 1995, cap 10.

[7] M. Nakazawa and E. Yoshida, *40- GHz 850 fs regeneratively FM-Mode locked polarization maintaining erbium fiber ring laser*, IEE Photon. Tech Letters, vol 12, pp. 1613-1615, 2000

[8] E. Yoshida, M. Nakazawa, *80-20 Ghz erbium doped fiber laser using a rational harmonic mode-locking technique*, Electron., Lett, vol 36, no5, pp1370-1372, 1996

[9] S.G. Edirisinghe, A. S. Siddiqui and X. Shan, *Stabilised 10 GHz rationally mode-locked erbium fiber laser and its use in 40 Gbit/s RZ data transmission system over 240 km of standard fibre*, IEE Proc-optoelectron Vol 147, N°6, Dec 2000

[10] Kuizenga, A. Siegman, *"FM and AM mode locking of homogeneous laser"*, IEEE J. Quant. Electr., 6, 694 (1970)

[11] Siegman, Lasers

[12] C. Wu and N.K. Datta, "High repetition optical pulse generation using a rational harmonic mode-locked fiber laser", IEEE J. Quantum Electron. Vol36 pp145-1580, Feb. 2000.

[13] Kamal K. Gupta, Noriaki Onodera, Masaharu Hyodo, Masayoshi Watanabe, Jeevarathinam Ravikumar, "Evaluation of Amplitude Stabilized Optical Pulse Trains From Rational Harmonically Mode Locked Fiber Ring Lasers", Journal of Lightwave Technology, vol 22, n°8, aug 2004

[14] Kenji Kuroda, Hideki Takakura, "Mode locked ring laser with output pulse width of <0.5 ps", Teratec Corporation, USA May18-21, 1998

[15] X. Shan D. Cleland and A. Ellis "Establishing Er Fiber Soliton Laser with Pulse phase Locking", Electronics letter, vol28, n°2, pp182-183, jan1992

[16] X. Shan and D. M. Spirit, "Novel method to suppress noise in harmonically mode-locked erbium fiber lasers", Electron. Lett... vol29 n°11, pp979-981. May1993

[17] H. Takara, S. Kawanishi, M. Saruwatari, K. Noguci, "Generation of Highly Stable 20 GHz transform-limited optical pulses from actively mode locked Er⁺³ Doped Fiber Lasers with an all polarization maintaining ring cavity", Electron. Lett. Vol 28, N°22, Oct 1992

[18] Liam P. Barry, Philippe Guignard, Jean Debeau, Remi Boittin, and Martine Bernard, "A High-speed Optical Star Network Using TDMA

and All-Optical Demultiplexing Techniques", IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 14, NO. 5, JUNE 1996

[19] RODNEY S. TUCKER, EE, G AD1 EISENSTEIN AND STEVEN K. KOROTKY, "Optical Time-Division Multiplexing For Very High Bit-Rate Transmission", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY. VOL. 6. NO. 11. NOVEMBER 1988

[20] H.-M. REIN J. HAUENSCHILD, W. McFarland, D. PETTENGILL, "20 Gbits, 205km OPTICAL TIME DIVISION

MULTI PLEXED TRANSMISSION SYSTEM", Elect Lett 23, Vol 27, n°11, May 1991

[21] Bing C. Wang, Ivan Glesk, Robert J. Runser, Paul R. Prucnal "A Fast Tunable Parallel Optical Delay Line"

- [22] Jian-Guo Zhang, "Very-high-speed fiber-optic networks for broadband communications", ELECTRONICS & COMMUNICATION ENGINEERING JOURNAL DECEMBER 1996.
- [23] Paul Phelan, Gerald Farrell and John Hegarty, "All Optical Synchronization and Frequency Division of Mode Locked Pulses", IEE Photonics Technology letter, vol 4, n°8, aug 1992
- [24] A. Craig Beal, Patrick D. Kumavor, John H. Kelm and Bing C. Wang, "Fast Tunable Parallel Optical Delay Line for Multi-rate Communication and Dynamic Bandwidth Allocation",
- [25] Ron Hui, Sen Zhang, "40Gb/s Optical Transmission System Test bed", Technical Report, ITT Jan 2004.

7. Apêndice Alpha

Programa Alpha

Programa para cálculo dos parâmetros da cavidade do laser em anel para pulsos curtos

Antonio Breno de Alleluia

45-50 ps para sistema OTDM

> `Digits:=4:`

Valor da dispersão na fibra standard para propagação de pulsos curtos em telecomunicações

D=17 ps/km.nm

> `D1:=17:`

Duração do pulso em ps

> `T[0]:=38*1e-12:`

> `tau:=38:`

Coefficiente para SPM 1/WKm

> `gamma1:=2:`

Comprimento de onda em nm:

> `lambda[0]:=1554.67:`

Velocidade da luz m/s

> `c:=2*1e8;`

`c:=0.2 109`

>

Tamanho da cavidade do anel em metros

```
> L:=20.87:
```

Frequência fundamental

```
> f[cav]:=c/L;c:=3*1e8:#unidade MHz
```

$$f_{cav} := 0.9583 \cdot 10^7$$

Valor da GVD

```
> beta2:=(lambda[0]^2)*D1/(2*Pi*3e8)*1e-9;
```

$$\beta_2 := \frac{0.6853 \cdot 10^{-10}}{\pi}$$

```
> beta2:=evalf(beta2);
```

$$\beta_2 := 0.2181 \cdot 10^{-10}$$

O valor da potência de pico fica determinada pela relação

```
> taxal:=evalf(2.458908508*1e9)^(-1):
```

Potência média medida no anel na entrada do fotodetector

```
> P[m]:=10^(-1.18);#unidade em Watts
```

$$P_m := 0.06607$$

```
> P[pico]:=taxal/(tau*1e-12)*P[m];#unidade em Watts
```

$$P_{pico} := 0.7069$$

Ordem do pulso

```
> N:=sqrt(P[pico]*gamma1*T[0]^(2)/(beta2*1e-12));
```

$$N := 9.676$$

O valor da dispersão na cavidade

```
> n:=1:c:=2*1e8:
```

```
> Delta:=n*lambda[0]*sqrt((2*n)/(c*(D1*1e-12)*L*(1e6))-0.0787*((lambda[0]*1e-9)^2)/((c*tau*1e-12)^2));# unidade em ps/km.nm
```

$$\Delta := 6.741$$

Ordem do harmônico travado

```
>
```

```
> N_harm:=taxa1^(-1)/f[cav];
      N_harm := 256.6
```

```
>
```

Quantidade de modos acoplados

```
> modos_acopl:=(f[cav]^(-1))/(T[0]);
      modos_acopl := 2747.
```

Comprimento não linear da cavidade

```
> L[nl]:=1/(gamma1*P[pico]);#unidade em km
      L_nl := 0.7073
```

Comprimento dispersivo da cavidade

```
> L[d]:=T[0]^2/(beta2*1e-12);#unidade em km
      L_d := 66.21
```

Comprimento de atuação na fibra em função dos comprimentos lineares e não lineares unidade em km.

```
> L[a]:=sqrt(L[d]*L[nl]);
      L_a := 6.843
```

```
>
```

O valor de alargamento espectral do pulso em relação aos parâmetros calculados anteriormente para o comprimento de atuação na fibra

```
> fat_compress:=sqrt(L[d]/L[nl]);
      fat_compress := 9.675
```

```
>
```

Como no setup tamanho da cavidade é muito menor que o comprimento de atuação, o efeito de dispersão praticamente não ocorre posso desprezar o primeiro termo no lado direito da equação do pulso na fibra.

Equação desprezando o efeito da dispersão que é mínimo no setup

```
>
eq:=-
I*diff(E(z),z)+1/2(n[2]/n[1])*K[0]*abs(E(z))^2*E(z)-
I*gamma2*E(z);
```

$$eq := -\left(\frac{d}{dz} E(z)\right) I + \frac{1}{2} K_0 |E(z)|^2 E(z) - \gamma^2 E(z) I$$

De modo que durante a propagação do pulso tenho que o formato temporal do pulso não sofre alteração, porém suas componentes espectrais são alargadas.

O alargamento espectral do pulso é determinado por :

```
>
omega:=(2*Pi/(2*lambda[0]))*n2*L*diff(abs(E(t))^2,t);
```

$$\omega := 0.001286 \pi n_2 L |E(t)| \text{abs}(1, E(t)) \left(\frac{d}{dt} E(t) \right)$$

>

Grau de importância para os efeitos de dispersão e não linear, como $R > 1$ o efeito não linear é extremamente importante de modo que o pulso se alarga a medida que se propaga pela fibra de modo que o envelope do pulso se alarga mais rápido do que na propagação com dispersão linear.

```
> R:=L[d]/L[n1];
```

$$R := 372.6$$

Em consequência o comprimento da fibra externo será km para o caso de "dispersion free"

```
> L[opt1]:=2.5*L[a];
```

```
>
```

$$L_{opt1} := 8.578$$

O pulso alargado temporalmente, possui um perfil retangular aproximadamente, de modo que é muito importante que a lei de frequência linear do chirp é desse modo alcançada, o grau de compressão possível é determinado pela relação (não estou comprimindo o pulso, pois não consegui ainda)

```
> (Tau[0]/(Tau*cpr))=0.63*fat_compress;
```

$$\frac{T_0}{T_{cpr}} = 12.16$$

Comprimento ideal para efeitos não lineares em km

```
> L[opt2] := (0.5+1.7/sqrt(R)) * L[a];
```

$$L_{opt2} := 2.018$$

```
> expr1:=0.050*sqrt(2*Pi)/T[0]*exp(-(t-500e-
12)^2/T[0]^2);expr2:=0.050*sqrt(2*Pi)/T[0]*exp(-(t-
1000e-12)^2/T[0]^2);expr3:=0.050*sqrt(2*Pi)/T[0]*exp(-
(t-1500e-
12)^2/T[0]^2);expr4:=0.050*sqrt(2*Pi)/T[0]*exp(-(t-
2000e-12)^2/T[0]^2);
```

```
>
```

```
>
```

$$expr1 := 0.1316 \cdot 10^{10} \sqrt{2} \sqrt{\pi} e^{\left(-0.6925 \cdot 10^{21} (t - 0.500 \cdot 10^{-9})^2\right)}$$

$$expr2 := 0.1316 \cdot 10^{10} \sqrt{2} \sqrt{\pi} e^{\left(-0.6925 \cdot 10^{21} (t - 0.1000 \cdot 10^{-8})^2\right)}$$

$$expr3 := 0.1316 \cdot 10^{10} \sqrt{2} \sqrt{\pi} e^{\left(-0.6925 \cdot 10^{21} (t - 0.1500 \cdot 10^{-8})^2\right)}$$

$$expr4 := 0.1316 \cdot 10^{10} \sqrt{2} \sqrt{\pi} e^{\left(-0.6925 \cdot 10^{21} (t - 0.2000 \cdot 10^{-8})^2\right)}$$

```
> plot([expr1,expr2,expr3,expr4],t=0..3e-9);
```

```
> with(inttrans):
```

```
> expr2:=fourier(expr2,t,w);
```

$$expr2 := 1.396 e^{(-0.1000 \cdot 10^{-8} I w - 0.3610 \cdot 10^{-21} w^2)} \text{Dirac}(w)$$

```
> plot(expr2,w=-10e9..10e9);
```

```
> expr1;with(tensor):with(plots):plot(expr1,t=400e-
12..700e-12);
```

$$0.1316 \cdot 10^{10} \sqrt{2} \sqrt{\pi} e^{\left(-0.6925 \cdot 10^{21} (t - 0.500 \cdot 10^{-9})^2\right)}$$

```
>
```

```
expr3:=0.1316e10*sqrt(2*Pi)*exp(-
0.6925*10e21*t^2+phi);
```

```
>
```

$$expr3 := 0.1316 \cdot 10^{10} \sqrt{2} \sqrt{\pi} e^{(-0.6925 \cdot 10^{22} t^2 + \phi)}$$


```
>
E_out:=1/4*(exp(I*phi*t)+exp(I*2*phi*t)+exp(I*3*phi*t)+
exp(I*4*phi*t));
```

$$E_{out} := \frac{1}{4} e^{(\phi t I)} + \frac{1}{4} e^{(2 I \phi t)} + \frac{1}{4} e^{(3 I \phi t)} + \frac{1}{4} e^{(4 I \phi t)}$$

```
>
>
> final:=evalf(E_out*conj(E_out));
final := (0.2500 e(1. I φ t) + 0.2500 e(2. I φ t) + 0.2500 e(3. I φ t) + 0.2500 e(4. I φ t))
(0.2500 e(-1. I φ t) + 0.2500 e(-2. I φ t) + 0.2500 e(-3. I φ t) + 0.2500 e(-4. I φ t))
> plot(final, phi=0..80):
>
>
>
E_out2:=1/4*(exp(I*(-
Omega*t+phi))+exp(I*(Omega*t+2*phi))+exp(I*(Omega*t+3*phi))+exp(I*(Omega*t+4*phi)));
E_out2 := 1/4 e((-Ω t+φ) I) + 1/4 e((Ω t+2 φ) I) + 1/4 e((Ω t+3 φ) I) + 1/4 e((Ω t+4 φ) I)
> final2:=evalf(E_out2*conj(E_out2));
final2 := (0.2500 e(1. I (-1. Ω t+φ)) + 0.2500 e(1. I (Ω t+2. φ)) + 0.2500 e(1. I (Ω t+3. φ))
+ 0.2500 e(1. I (Ω t+4. φ))) (0.2500 e(1. I (Ω t-1. φ)) + 0.2500 e(-1. I (Ω t+2. φ))
+ 0.2500 e(-1. I (Ω t+3. φ)) + 0.2500 e(-1. I (Ω t+4. φ)))
>
>
animate(final, phi=0..4, t=0..8, numpoints=500, frames=80);
```

Análise para a nova sequência de pulsos

```
> E_out3:=0.050*sqrt(2*Pi)/T[0]*exp(-(t-500e-
12)^2/T[0]^2)+0.050*sqrt(2*Pi)/T[0]*exp(-(t-1000e-
12)^2/T[0]^2)+0.050*sqrt(2*Pi)/T[0]*exp(-(t-1500e-
12)^2/T[0]^2)+0.050*sqrt(2*Pi)/T[0]*exp(-(t-2000e-
12)^2/T[0]^2);
```

```


$$E\_out3 := 0.1316 \cdot 10^{10} \sqrt{2} \sqrt{\pi} e^{\left(-0.6925 \cdot 10^{21} (t - 0.500 \cdot 10^{-9})^2\right)}$$


$$+ 0.1316 \cdot 10^{10} \sqrt{2} \sqrt{\pi} e^{\left(-0.6925 \cdot 10^{21} (t - 0.1000 \cdot 10^{-8})^2\right)}$$


$$+ 0.1316 \cdot 10^{10} \sqrt{2} \sqrt{\pi} e^{\left(-0.6925 \cdot 10^{21} (t - 0.1500 \cdot 10^{-8})^2\right)}$$


$$+ 0.1316 \cdot 10^{10} \sqrt{2} \sqrt{\pi} e^{\left(-0.6925 \cdot 10^{21} (t - 0.2000 \cdot 10^{-8})^2\right)}$$

> plot(E_out3, t=0..3000e-12, numpoints=100000);

> ?animate;

> animate( sin(x*t), x=-10..10, t=1..2, frames=50);

> exprteste:=0.050*sqrt(2*Pi)/T[0]*exp(-(I*(x-500e-
12)^2*t)/T[0]^2);


$$exprteste := 0.1316 \cdot 10^{10} \sqrt{2} \sqrt{\pi} e^{\left(-0.6925 \cdot 10^{21} I (x - 0.500 \cdot 10^{-9})^2 t\right)}$$

> resultado_teste:=1e-
19*evalf(exprteste*conj(exprteste));


$$resultado\_teste := 1.088 e^{\left(-0.6925 \cdot 10^{21} I (x - 0.500 \cdot 10^{-9})^2 t\right)} e^{\left(0.6925 \cdot 10^{21} I (x - 0.500 \cdot 10^{-9})^2 t\right)}$$

> animate(exprteste, x=0e-12..800e-
12, t=0..10, numpoints=500, frames=100);

```