

文章编号 : 0253-2239(2002)09-1044-07

光相位共轭色散补偿波分复用系统的传输带宽

邵钟浩 张国强 马 骏

(南京邮电学院通信工程系, 南京 210003)

摘要: 导出了光相位共轭器(OPC)接于常规单模光纤链路中点的色散补偿波分复用(WDM)系统传输带宽的估算公式,并用数值仿真的结果验证了公式的正确性;采用不对称接入光相位共轭器提高传输带宽的方法,导出了光相位共轭器接入位置对传输带宽影响的估算公式;利用公式估算和数值仿真的结果表明,当光相位共轭器处于最佳接入位置时,色散补偿的波分复用系统的传输带宽可以提高近一倍。

关键词: 传输带宽;光学相位共轭;色散补偿;波分复用

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

1 引 言

随着光纤传输系统速率的不断提高和掺铒光纤放大器的实用化,光纤色散已成为限制中继距离的主要因素。这一问题在常规单模光纤(G.652)传输系统的升级扩容和工作波长变换时显得尤为突出,为此,人们提出了多种克服色散影响的色散补偿技术,以延长色散限制的传输中继距离。

早在 1979 年 Yariv 等^[1]首先提出了利用光相位共轭技术,即频谱反转技术,以实现光纤色散补偿的可能性,但直到大功率的掺铒光纤放大器出现后,这种方法才开始受到广泛关注。实验和理论研究表明,采用这种方法不仅可以同时补偿光纤中群速度色散和自相位调制效应的影响,而且光相位共轭对信号的格式不敏感,即对信号的具体形式是透明的;最近 Watanabe 等^[2]采用基于光纤四波混频的光相位共轭色散补偿技术实现了 5 个信道 40 Gb/s 光信号在 105 km 常规单模光纤上的传输,这表明光相位共轭色散补偿技术也适合于光波分复用系统中,从而展示了光相位共轭补偿技术的广阔应用前景。

本文主要研究光相位共轭色散补偿对常规单模光纤波分复用系统的传输带宽,首先简要介绍了光相位共轭色散补偿原理;然后,采用数值仿真的方法,分析了光相位共轭器前后两段光纤的色散不平衡对单信道传输系统性能的影响;在此基础上,导出了光相位共轭器中点接入常规单模光纤波分复用系统传输带宽的估算公式,并用数值仿真的结果验证

了公式的正确性;采用了不对称接入光相位共轭器提高传输带宽的方法,导出了光相位共轭器接入位置对传输带宽影响的估算公式;利用公式计算的结果和数值仿真的结果一致表明:当光相位共轭器处于最佳位置时,色散补偿波分复用系统的传输带宽可以提高将近一倍。

2 光相位共轭色散补偿原理

光脉冲在光纤中的传输可用非线性薛定谔方程描述:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + i\gamma|A|^2 A, \quad (1)$$

式中, A 为光场的复数包络振幅, z 为传输距离, T 为归一化时间, $T = t - \beta_1 z$, t 为时间, β_1 、 β_2 分别为光纤的群速度参量和群速度色散参量, α 为衰减系数, γ 为非线性系数。(1)式的共轭形式为

$$-\frac{\partial A^*}{\partial z} = +\frac{\alpha}{2}A^* - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A^*}{\partial T^2} + i\gamma|A^*|^2 A^*, \quad (2)$$

两个方程对光脉冲在光纤中的传输特性的描述都是有效的。(1)式的解描述光纤中前向传输(+ z 方向)的信号,由于(2)式中 α 项符号改变,故(2)式的解描述光纤中后向传输(- z 方向)的信号,两种信号包络振幅在光纤中任何相同位置上复数共轭,采用光相位共轭进行色散补偿的设想就是根据这种互相共轭关系提出的^[3]。

图 1 为光相位共轭色散补偿的原理图。光相位共轭器置于光纤链路的中间,输入光脉冲经第一段

光纤传输后,经光相位共轭,即频谱反转后,继续在第二段光纤中传输,到达接收端。通过信号中途频谱反转,若能在光纤链路上,使对称于光相位共轭器的任何左右两点的光脉冲振幅复共轭,则就能在接收端得到未经传输的输入脉冲的复共轭,实现对光纤中群速度色散和自相位调制影响的完全补偿。

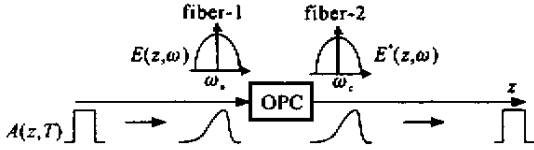


Fig. 1 Schematic diagram of dispersion compensation using OPC.

$E(z, \omega)$: the spectrum of signal; $A(z, T)$: the amplitude of optical signal

根据(1)式和(2)式,要实现对群速度色散和自相位调制影响的完全补偿必须满足下列两个条件。第一,由于(2)式中 α 项的符号变正,要求传输系统的后半段应具有分布增益,而不是衰减,这一条件只有在理想无损耗光纤($\alpha = 0$)传输时才能满足。第二,光相位共轭器前后两段光纤色散分布均匀且总色散相等。显然,对于一个实际的光相位共轭色散补偿传输系统,这两个条件难于得到满足,从而影响补偿效果。

当光相位共轭器前后两段光纤的 α 、 β_2 和 γ 为常数,且光纤中传输光的强度沿 z 方向变化不大时,同时补偿群速度色散和自相位调制影响的条件可近似表达为^[4]

$$\beta_{21} L_1 = \beta_{22} L_2, \quad (3)$$

和

$$\gamma_1 \bar{P}_1 L_1 = \gamma_2 \bar{P}_2 L_2, \quad (4)$$

式中, β_{21} 、 β_{22} 分别为光相位共轭器前后两段光纤的群速度色散参量, γ_1 、 γ_2 分别为两段光纤的非线性系数, L_1 、 L_2 分别为两段光纤的长度, \bar{P}_1 、 \bar{P}_2 分别为两段光纤中的通道平均峰值功率。

$$\bar{P}_1 = P_1 [1 - \exp(-\alpha_1 L_1)] / (\alpha_1 L_1), \quad (5)$$

$$\bar{P}_2 = P_2 [1 - \exp(-\alpha_2 L_2)] / (\alpha_2 L_2), \quad (6)$$

P_1 、 P_2 分别为两段光纤的初始峰功率, α_1 、 α_2 分别为两段光纤的衰减系数。在常规单模光纤传输系统中可采用在链路中点接入光相位共轭器的方式实现色散补偿,当光相位共轭器前后两段光纤的特性一致,且 $P_1 = P_2$ 时,可同时满足(3)式和(4)式表示的条件,获得较好的补偿效果。

3 光相位共轭器前后两段光纤色散不平衡对系统性能的影响

在常规单模光纤组成的波分复用系统中,也可采用光相位共轭器中点接入的方式,同时补偿光纤群速度色散和自相位调制效应对各信道传输性能的影响,但由于各信道间工作波长的差异,谱反转前后信号波长的变化,以及光纤的色散特性等原因,会引起同一信道内光相位共轭器前后两段光纤的色散不平衡,即使光相位共轭器本身的带宽很理想,也会造成不同信道的补偿效果不同,影响信道传输性能,使波分复用系统传输带宽受限,限制复用的信道数。本节采用数值仿真的方法研究光相位共轭器中点接入单信道色散补偿传输系统中,色散不平衡对传输系统性能的影响规律,为光相位共轭色散补偿波分复用系统的带宽提供依据。

3.1 传输系统模型和数值仿真

图2为仿真传输系统示意图。TX和RX分别表示光发送和接收端机, L 为传输距离,光相位共轭器置于光纤链路的中间,采用掺铒光纤放大器补偿光纤衰减,光放大器间距为 l ,强度调制的光发射信号为非归零码,光脉冲为无啁啾的超高期脉冲即

$$A(0, T) = \sqrt{P_0} \sum a_k B(T - kT_b), \quad (7)$$

式中, P_0 为峰值功率, a_k 为脉冲序列(取为0011100110101010), T_b 为比特持续时间,则归一化的超高斯脉冲,

$$B(T) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2m}\right], \quad (8)$$

m 为超高斯脉冲陡度,取 $m = 1.436$, T_0 为光脉冲在强度的 $1/e$ 处的半宽值,

$$T_b = (\chi \ln 2)^{1/2m} T_0. \quad (9)$$

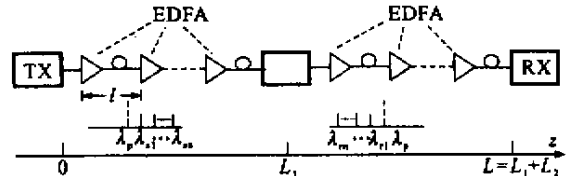


Fig. 2 The model of the simulated transmission system

光脉冲在光相位共轭器前后两段光纤上传播时引起的波形畸变,可以采用分步傅里叶数值求解非线性薛定谔方程式(1)得到^[5]。由于光相位共轭器的存在,需要将前段光纤在光相位共轭器处的输出信号包络振幅 $A(L_1, T)$ 取复共轭,即求得 $A^*(L_1, T)$,并以此作为后段光纤的输入信号包络

振幅。(1)式中的群速度色散参量 β_2 可以用光纤色散系数表示,其关系为

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c}D, \quad (10)$$

式中, D 为光纤的色散系数, λ 为真空中的光波长, c 为真空中的光速。为简化计算, 设光相位共轭器本身的带宽足够宽, 插入损耗为零, 并忽略系统中掺铒光纤放大器自发辐射噪声的影响。

接收端信号由光电二极管作平方检测, 然后送入二阶巴特沃斯(Butterworth)低通滤波器^[6], 其 3 dB 带宽为 $0.65/T_b$ 。滤波器输出信号用眼图表示, 系统传输性能用色散光功率代价 P_d 来衡量, $P_d = \log(a/b)$ 式中, a 为发射机和接收机背靠背连接时接收机输出眼图张开度, b 为模拟传输系统的接收机输出眼图张开度^[7]。

3.2 光相位共轭器前后两段光纤色散不平衡对单信道传输系统性能的影响

为计算光相位共轭器前后两段光纤色散不平衡对系统性能的影响, 设光相位共轭器置于光纤链路中点, 即 $L_1 = L_2 = L/2$, 并设光相位共轭器产生的共轭波长和信号波长相同, 但前后两段光纤的色散系数 D_1 和 D_2 间相差 ΔD , 即两段光纤间的色散不平衡为

$$\Delta D_t = D_2 L_2 - D_1 L_1 = \Delta D(L/2), \quad (11)$$

据此计算系统光功率代价 P_d 和两段光纤的色散不平衡 ΔD_t 的关系。

计算中还取常规单模光纤参量为 $D_1 = 17$ ps/nm/km, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.25$ dB/km, $\gamma_1 = \gamma_2 = 1.2 \times 10^{-3}$ (Wm)⁻¹, 取系统传输速率 $B = 10$ Gb/s, $l = 100$ km, 两段光纤的通道平均峰值功率相等为 \bar{P} , 为观察光纤中自相位调制效应对系统性能的影响, 分别取 $\bar{P} = 0, 1, 3$ dBm 三种情况, 计算结果如图 3 所示。为便于比较, 图中还画出了在无光相位共轭器色散补偿, 只有群速度色散影响的线性传输系统中光功率代价 P_d 和链路总色散 D_t (即 $D \cdot L$) 的关系。

由曲线可见, 随着光相位共轭器前后两段光纤色散不平衡 ΔD_t 的增大, P_d 增大, 系统传输性能劣化。 P_d - ΔD_t 曲线并不对称于 $\Delta D_t = 0$ 的直线, 在色散不平衡为负值时, 它与线性传输系统的 P_d - D_t 曲线间有差异, 而且随着色散不平衡值(即绝对值)的增大而增大, 这是由于光纤中自相位调制效应和不平衡色散互相作用而导致的。当色散不平衡为负值时, 两者的互相作用使光脉冲展宽程度有所加剧, 而

当色散不平衡为正值时, 两者作用使光脉冲展宽程度有所减弱。在曲线上, 若以 $P_d = 1$ dB 为色散限制界限, 对于光相位共轭色散补偿传输系统, 当通道平均光功率取较小时, 例如 $\bar{P} = 0$ dBm, 则允许的色散不平衡变化范围为 -850 ps/nm \sim 950 ps/nm; 而对于无光相位共轭器补偿的线性传输系统, 允许的链路总色散变化范围为 -950 ps/nm \sim 950 ps/nm, 两种情况下允许的色散变化范围大致相同, 可见在通道平均光功率较小时, 光相位共轭色散补偿传输系统的性能主要取决于色散不平衡, 自相位调制效应的影响可以忽略。

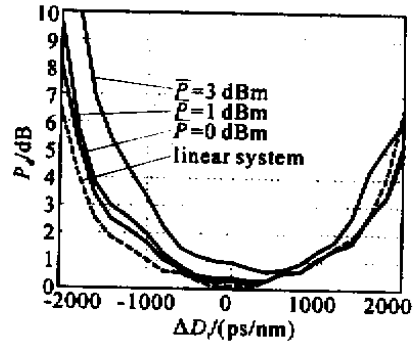


Fig. 3 Optical power penalty P_d as a function of the dispersion imbalance ΔD_t , where $B = 10$ Gb/s, $\bar{P} = 0, 1, 3$ (dBm), $L = 2000$ km, $l = 100$ km

4 光相位共轭器中点接入常规单模光纤波分复用系统的传输带宽

本节主要研究基于信道内色散不平衡限定的波分复用系统的传输带宽 $\delta\lambda$, 即在保证信道传输质量的前提下, 由信道内色散不平衡限定的系统最小和最大工作波长的间隔

$$\delta\lambda = \lambda_{sn} - \lambda_{sl}, \quad (12)$$

式中, λ_{sn} 和 λ_{sl} 分别为波分复用系统中最大和最小工作波长。为此, 分析过程中设光纤中自相位调制的影响可以忽略, 光相位共轭器和掺铒光纤放大器本身的带宽足够宽。

4.1 传输带宽的估算公式

在由半导体激光放大器^[8]或色散位移光纤(DSF)^[9]组成的光相位共轭器中, 同一信道的工作波长 λ_s 和谱反转后的信号波长 λ_r 的关系为

$$\lambda_s - \lambda_p = \lambda_p - \lambda_r, \quad (13)$$

式中, λ_p 为光相位共轭器的抽运波长。

而对于常规单模光纤, 其色散系数在 1550 nm 附近可表示为

$$D = \frac{S}{4}(\lambda - \lambda_0^4/\lambda^3), \quad (14)$$

式中, S 为零色散斜率, λ_0 为零色散波长, λ 为信号波长。根据 (10) 式、(14) 式可用群速度色散参量 β_2 表示:

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c}D = -\frac{S}{8\pi c}(\lambda^3 - \lambda_0^4/\lambda), \quad (15)$$

因此, 对于光相位共轭器位于光纤链路中点的波分复用传输系统, 同一信道由光相位共轭器前后信号波长不同而引起的色散不平衡可表示为

$$\Delta\beta_{2t} = \frac{L}{2}(\beta_{2r} - \beta_{2s}), \quad (16)$$

式中, β_{2r} 、 β_{2s} 分别为光波长 λ_r 、 λ_s 对应的群速度色散参量, L 为光纤链路总长度。由于 λ_s 、 λ_r 和 λ_p 的间隔很小, 故 β_{2s} 、 β_{2r} 可分别表示为

$$\beta_{2s} \approx \beta_{2p} + \frac{d\beta_2}{d\lambda}(\lambda_s - \lambda_p), \quad (17a)$$

$$\beta_{2r} \approx \beta_{2p} + \frac{d\beta_2}{d\lambda}(\lambda_r - \lambda_p), \quad (17b)$$

式中, β_{2p} 、 $d\beta_2/d\lambda$ 分别为抽运光波长 λ_p 对应的群速度色散参量和斜率。

根据 (15) 式

$$\beta_{2p} = -\frac{S}{8\pi c}(\lambda_p^3 - \lambda_0^4/\lambda_p), \quad (18)$$

$$\frac{d\beta_2}{d\lambda} = -\frac{S}{8\pi c}(3\lambda_p^2 + \lambda_0^4/\lambda_p^2), \quad (19)$$

将 (13) 式及 (17) 式 ~ (19) 式代入 (16) 式, 并整理得

$$\Delta\beta_{2t} = (\beta_{2r} - \beta_{2s})\frac{L}{2} = \frac{SL}{8\pi c}(3\lambda_p^2 + \lambda_0^4/\lambda_p^2)(\lambda_s - \lambda_p), \quad (20)$$

根据 3.2 节的分析结果, 在忽略光纤中自相位调制效应影响条件下, 可以利用无光相位共轭器补偿的线性传输系统的色散限制, 估算光相位共轭色散补偿波分复用系统中允许的信道色散不平衡, 从而得到传输带宽。而对于工作波长在 1550 nm 附近的线性传输系统, 若取光功率代价 $P_d = 1$ dB 为色散限制界限, 则允许的最大光纤链路总色散为^[6]

$$D_t = \pm \pi r c K (B^2 \lambda_s^2), \quad (21)$$

或

$$\beta_{2t} = \mp r K (2B^2), \quad (22)$$

式中, B 为系统传输速率, r 为色散指数, $r = 0.252$, λ_s 为工作波长, c 为真空中光速。当链路总色散 $D_t > \alpha$ ($\beta_{2t} < 0$) 时 (21) 式和 (22) 式的右边项分别取正号和负号; 当 $D_t < \alpha$ ($\beta_{2t} > 0$) 时, 则分别取

负号和正号。

根据 (22) 式的色散界限可估算系统的传输带宽。由于在 $(\lambda_s - \lambda_p) > 0$ 和 $(\lambda_s - \lambda_p) < 0$ 的两种情况下, 色散不平衡 $\Delta\beta_{2t}$ 的符号相反, 故需分别讨论。

当 $(\lambda_s - \lambda_p) > 0$ 时, 根据 (20) 式可知 $\Delta\beta_{2t} > 0$, 故可令

$$\Delta\beta_{2t} = \frac{L}{2}(\beta_{2r} - \beta_{2s}) = \frac{r}{2B^2}, \quad (23)$$

以求得系统允许的最大工作波长 λ_{sn} 。而系统允许的最小工作波长应 $\lambda_{sl} = \lambda_p$, 因此时对应的 $\Delta\beta_{2t} = 0$, 没有超出 (22) 式表示的色散限制界限。

将 (20) 式代入 (23) 式, 并令 $\lambda_s = \lambda_{sn}$, $\lambda_p = \lambda_{sl}$, 则可得传输带宽为

$$\delta\lambda = \lambda_{sn} - \lambda_{sl} = \frac{4\pi r c}{B^2 S L (3\lambda_p^2 + \lambda_0^4/\lambda_p^2)}, \quad (24)$$

式中, $\delta\lambda$ 为光相位共轭器中点接入常规单模光纤波分复用系统的传输带宽, $r = 0.252$, L 为传输距离, λ_0 、 s 分别为常规单模光纤的零色散波长和色散斜率。

当 $(\lambda_s - \lambda_p) < 0$ 时, 采用类上的分析, 并令 $\Delta\beta_{2t} = -r/2B^2$, $\lambda_s = \lambda_{sl}$, $\lambda_p = \lambda_{sn}$, 可得到的带宽计算公式与 (24) 式相同。

由 (24) 式可看出, 光相位共轭器中点接入常规单模光纤波分复用系统的传输带宽与传输速率的平方及传输距离成反比。

4.2 估算公式正确性的验证

在不同传输速率条件下, 根据 (24) 式计算出的传输带宽 $\delta\lambda$ 和距离 L 的关系如图 4 所示, 计算中取光相位共轭器抽运光波长 $\lambda_p = 1550$ nm, 光纤零色散斜率 $S = 0.093$ ps/nm²/km, 零色散波长 $\lambda_0 = 1310$ nm。由图 4 可见, 对于 10 Gb/s, $L = 1000$ km 传输系统, 传输带宽可达 11 nm。

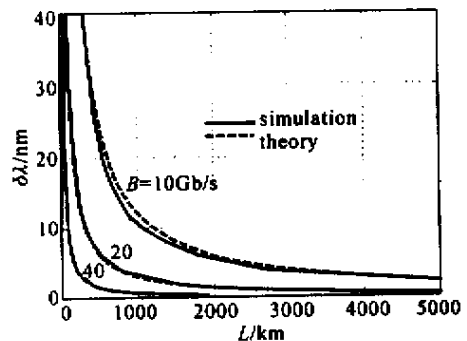


Fig.4 The transmission bandwidth of WDM system with OPC at the midway, where $\bar{P} = 0$ dBm, $l = 100$ km

为了验证估算公式的正确性,对上述波分复用系统中不同工作波长各信道的传输性能进行了数值仿真,即设定不同的信道工作波长 λ_s (即设定不同的 $\delta\lambda$)采用类似第3节中的计算步骤,通过数值求解非线性薛定谔方程,计算出 $P_d = 1$ dB时,对应的最大传输距离 L 。这时应考虑不同信道工作波长和共轭波长对应的光纤群速度色散参量 β_2 的差异,不同波长的 β_2 值可以用(14)式给定,式中 S 、 λ_0 的取值与用公式估算时取值相同。数值仿真中取

$\lambda_p = 1550$ nm,各信道的通道平均光功率相等 $\bar{P} = 0$ dBm,光放大器间距 $l = 100$ km,光纤其他参量 $\alpha = 0.25$ dB/km, $\gamma = 1.2 \times 10^{-3} (\text{Wm})^{-1}$ 。仿真结果如图4所示。

图5中还画出了 $B = 10$ Gb/s, $L = 1000$ km光相位共轭色散补偿系统中不同工作波长各信道的接收眼图的仿真结果,图中纵坐标代表相对强度,横坐标代表相对比特时间^[6],1551 nm和1561 nm分别代表系统最小和最大工作波长。

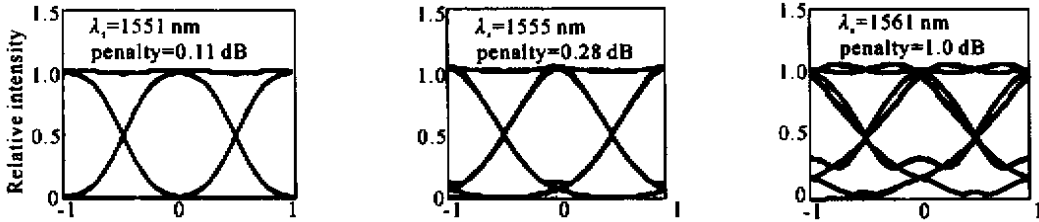


Fig. 5 Eye diagram at different operating wavelength channels in the WDM system with OPC at the midway, where $B = 10$ Gb/s, $\lambda_p = 1550$ nm, $L = 1000$ km, $l = 100$ km, $\bar{P} = 0$ dBm. Vertical axis: relative intensity, horizontal axis: relative bit time

由图4可见数值仿真曲线和理论计算曲线比较吻合,尤其在 $B = 20$ Gb/s,40 Gb/s时,两条曲线基本重合,从而验证了估算公式的正确性。

ΔL 为两段光纤的长度差, $\Delta L > 0$ 则同一信道的色散不平衡

$$\Delta\beta'_{2t} = \beta_{2r}L_2 - \beta_{2s}L_1 = (\beta_{2r} - \beta_{2s})\frac{L}{2} + (\beta_{2r} + \beta_{2s})\frac{\Delta L}{2}$$

5 采用不对称接入光相位共轭器的方式提高系统的传输带宽

根据(17)式取 $\beta_{2p} \approx (\beta_{2r} + \beta_{2s})/2$ 代入上式得

$$\Delta\beta'_{2t} = (\beta_{2r} - \beta_{2s})\frac{L}{2} + \beta_{2p}\Delta L \quad (25)$$

(22)式表示出在光相位共轭器色散补偿的波分复用系统中,当取 $P_d = 1$ dB时,允许同一信道的色散不平衡在 $-r(2B^2) \sim r(2B^2)$ 范围内变化,各信道的传输性能不会受到显著的影响。而对于光相位共轭器中点接入时传输带宽的分析过程中表明,对于 $P_d = 1$ dB,当 $\lambda_s > \lambda_p$ 时,在传输带宽内的色散不平衡变化范围为 $0 \sim r(2B^2)$ (参考图6说明);而当 $\lambda_s < \lambda_p$ 时,传输带宽内的色散不平衡变化范围为 $-r(2B^2) \sim 0$ 。两种情况都只利用了允许色散不平衡变化范围的一半,说明光相位共轭器色散补偿波分复用系统的带宽还有潜力可挖。为此,可采用不对称接入光相位共轭器的方式,通过调整光相位共轭器在光纤链路中接入点的位置,使系统中部分信道的色散不平衡处于 $-r(2B^2) \sim 0$ 的范围,而另一部分信道的色散不平衡处于 $0 \sim r(2B^2)$ 的范围,以期提高系统的传输带宽。

据此,采用类似上节的分析方法,可求得采用不对称接入光相位共轭器方式时系统带宽的估算公式。

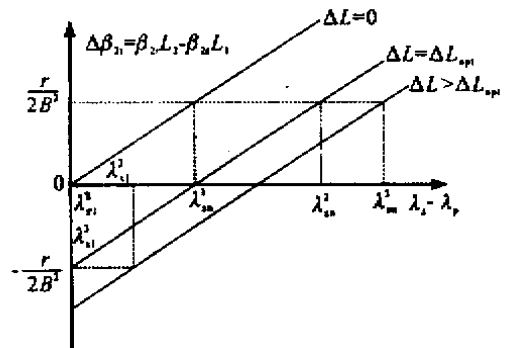


Fig. 6 Channel dispersion imbalance $\Delta\beta'_{2t}$ as a function of operating wavelength λ_s , where $\lambda_{sl}^1, \lambda_{sn}^1, \lambda_{sl}^2, \lambda_{sn}^2, \lambda_{sl}^3, \lambda_{sn}^3$ represent the minimum and maximum operating wavelength respectively in the case of $\Delta L = 0, \Delta L = \Delta L_{opt}, \Delta L > \Delta L_{opt}$

在 $\lambda_s > \lambda_p$ 的情况下,系统允许的最大工作波长 λ_{sn} 可根据(22)式,令

$$\Delta\beta'_{2t} = (\beta_{2r} - \beta_{2s})\frac{L}{2} + \beta_{2p}\Delta L = \frac{r}{2B^2} \quad (26)$$

如图2所示的传输模型中,设光相位共轭器前后两段光纤的长度为

$$L_1 = \frac{L - \Delta L}{2}, \quad L_2 = \frac{L + \Delta L}{2}$$

求得。系统允许的最小工作波长 λ_{s1} 要根据 ΔL 取值不同分别求得。当 ΔL 满足下列条件

$$\beta_{2p}\Delta L \geq -\frac{r}{2B^2}, \quad (27)$$

时 则

$$\Delta L \leq \Delta L_{opt} = \frac{4\pi rc}{B^2 S(\lambda_p^3 - \lambda_0^4/\lambda_p)}, \quad (28)$$

式中 ΔL_{opt} 称为最佳不平衡长度。由于 $\lambda_s = \lambda_p$ 对应的色散不平衡 $\Delta\beta'_{2t}$ 没有超出色散限制的下限 $-r/2B^2$ (参考图 6 说明), 故可取 $\lambda_{s1} = \lambda_p$ 。当 $\Delta L > \Delta L_{opt}$ 时, 由于 $\lambda_s = \lambda_p$ 对应的 $\Delta\beta'_{2t}$ 已超出色散限制的下限, 这时的 λ_{s1} 应根据 (22) 式, 令

$$\Delta\beta'_{2t} = (\beta_{2r} - \beta_{2s})\frac{L}{2} + \beta_{2p}\Delta L = -\frac{r}{2B^2} \quad (29)$$

求得。

根据以上分析, 可得到不同 ΔL 条件下的传输带宽估算式。当 $\Delta L < \Delta L_{opt}$ 时, 将 (18) 式、(20) 式代入 (26) 式, 并令 $\lambda_s = \lambda_{sn}$, $\lambda_p = \lambda_{sl}$, 整理后可得

$$\delta\lambda = \lambda_{sn} - \lambda_{sl} =$$

$$\left[\frac{4\pi rc}{B^2 S} + \Delta L \left(\lambda_p^3 - \frac{\lambda_0^4}{\lambda_p} \right) \right] / \left[L \left(3\lambda_p^2 + \frac{\lambda_0^4}{\lambda_p^2} \right) \right], \quad (30)$$

当 $\Delta L = \Delta L_{opt}$ 时, 将 (28) 式代入 (30) 式可得

$$\delta\lambda = \lambda_{sn} - \lambda_{sl} = \frac{8\pi rc}{B^2 SL} / \left(3\lambda_p^2 + \frac{\lambda_0^4}{\lambda_p^2} \right), \quad (31)$$

当 $\Delta L > \Delta L_{opt}$ 时, 将 (18) 式、(20) 式代入 (26) 式并令 $\lambda_s = \lambda_{sn}$, 将 (18) 式、(20) 式代入 (29) 式并令 $\lambda_s = \lambda_{sl}$, 则整理后可得

$$\delta\lambda = \lambda_{sn} - \lambda_{sl} = \frac{8\pi rc}{B^2 SL} / \left(3\lambda_p^2 + \frac{\lambda_0^4}{\lambda_p^2} \right), \quad (32)$$

在 (30) 式 ~ (32) 式中 ΔL 为光相位共轭器前后两段光纤的不平衡长度, 式中其他符号代表的意义与 (24) 式相同。(32) 式与 (31) 式表达完全相同, 可见只须满

足 $\Delta L = \Delta L_{opt}$ 的条件, 系统传输带宽就可达到最大。

在 $\lambda_s < \lambda_p$ 的情况下, 取 $L_1 - L_2 = \Delta L > 0$, 采用类似的分析推导可得到与 (30) 式 ~ (32) 式完全相同的传输带宽估算式。

对于 $B = 10 \text{ Gb/s}$, $L = 1000 \text{ km}$ 的光相位共轭色散补偿常规单模光纤波分复用系统, 根据 (30) 式计算出的传输带宽 $\delta\lambda$ 与不平衡长度 ΔL 的关系如图 7 所示, 计算中取 $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$ 。由曲线可见 $\delta\lambda$ 随 ΔL 的增加线性增加, 当 $\Delta L = \Delta L_{opt}$ 时, $\delta\lambda$ 达到最大, 其值为 24 nm 。

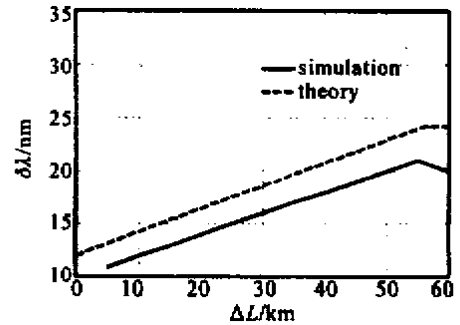


Fig.7 Transmission bandwidth $\delta\lambda$ as a function of the imbalance length ΔL , where $B = 10 \text{ Gb/s}$, $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$, $L = 1000 \text{ km}$, $\bar{P} = 0 \text{ dBm}$

为了验证 (30) 式的正确性, 对上述波分复用系统各信道的传输性能进行了数值仿真, 即设定不同的 ΔL , 采用类似第 3 节中的计算步骤, 通过数值求解非线性薛定谔方程, 计算 $P_d = 1 \text{ dB}$ 所限定的系统最小和最大工作波长, 从而得到对应的传输带宽。这时, 光纤的群速度色散参量 β_2 仍由 (14) 式给定, 仿真计算中的其他参量同 4.2 小节所述, 仿真结果如图 7 实线所示。当 ΔL 满足最佳长度条件时, 系统中不同工作波长各信道的接收眼图如图 8 所示, 图中坐标代表的意义同图 5, 1551 nm 和 1570 nm 分别代表波分复用系统的最小和最大工作波长。

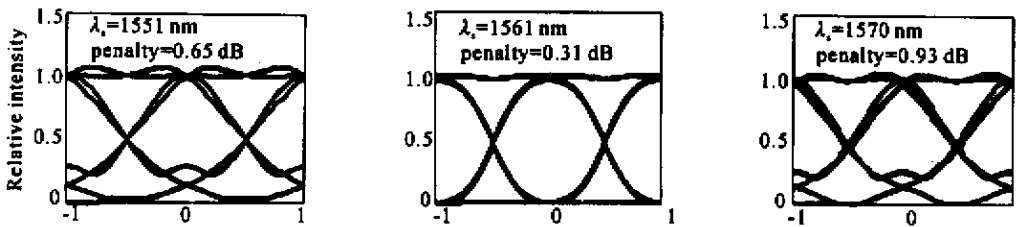


Fig.8 Eye diagrams at different operating wavelength channels in the WDM transmission system with OPC asymmetrically accessing, where $B = 10 \text{ Gb/s}$, $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$, $L = 1000 \text{ km}$, $\bar{P} = 0 \text{ dBm}$. Vertical axis: relative intensity, horizontal axis: relative bit time

由图 7 可见, 数值仿真结果与利用 (30) 式的估算结果基本吻合, 说明采用不对称接入光相位共轭器的方式可以提高波分复用传输系统的带宽, 但公

式估算值偏高, 且随着不平衡长度的增加, 偏差增大, 当 $\Delta L = \Delta L_{opt}$ 时, 误差约为 3 nm 。分析主要原因如下, 估算公式 (30) 是根据光相位共轭器的线性

传输系统的色散限制导出的, 而由 3.2 小节的分析可知, 在相同光功率代价的条件下, 线性传输系统允许的负色散值(即指绝对值, 下同)要比光相位共轭器色散补偿传输系统允许的负不平衡色散值大, 而且两者的差值随负色散值的增大而增大(如图 3 所示)因而, 据此求得的允许最大工作波长偏大, 导致公式估算值偏高, 而且随着不平衡长度增大, 负色散不平衡值增大, 估算值的偏差增大。

对比图 5 和图 8 可见, 采用不对称接入的方式, 当光相位共轭器处于最佳接入位置时, 即 $\Delta L = \Delta L_{\text{opt}}$ 时, 系统传输带宽提高近一倍。

结论 本文对光相位共轭色散补偿常规单模光纤波分复用系统的传输带宽进行了分析研究, 得到如下结论:

在光纤中自相位调制效应影响可以忽略的条件下, 光相位共轭器前后两段光纤的色散不平衡是影响传输带宽的主要因素。对于光相位共轭器中点接入常规单模光纤波分复用传输系统, 其传输带宽与传输速率的平方及传输距离成反比。可采用本文导出的公式(24)式来估算系统传输带宽。

采用不对称接入光相位共轭器的方式可以提高常规单模光纤波分复用系统的传输带宽。当光相位共轭器处于最佳接入位置时, 即光纤的不平衡长度 $\Delta L = \Delta L_{\text{opt}}$ 时, 可使传输带宽提高近一倍。

参 考 文 献

- [1] Yariv A, Fekete D, Pepper D M. Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation. *Opt. Lett.*, 1979, **4**(2): 52 ~ 54
- [2] Watanabe S, Takeda S, Ishikawa G. Simultaneous wavelength conversion and optical phase conjugation of 200 Gb/s (5×40 Gb/s) WDM signal using a highly nonlinear fiber four-wave mixer. *Proc. ECOC '97*, 1997. TH3A
- [3] Lorattanasane C, Kikuchi K. Design theory of long-distance optical transmission systems using midway optical phase conjugation. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6): 948 ~ 955
- [4] Watanabe S, Ishikawa G, Naito T *et al.*. Generation of optical phase-conjugation wave and compensation for pulse shape distortion in a single-mode fiber. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(12): 2139 ~ 2146
- [5] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. New York: Academic Press, 1989
- [6] Elrefaie A F, Wagner R E, Atlas D A *et al.*. Chromatic dispersion limitation in coherent lightwave transmission systems. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(5): 704 ~ 709
- [7] Ngo N Q, Binh L N, Dai Xianda. Optical dispersion eigencompensators for high-speed long-haul IM/DD lightwave systems: Computer simulation. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(10): 2097 ~ 2107
- [8] Iannone P P, Gnauck A H, Prucnal P R. Dispersion-compensated 333 km 10 Gb/s transmission using mid-span spectral inversion in an injection-locked InGaAsP V-groove laser. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1994, **6**(8): 1046 ~ 1048
- [9] Inoue K. Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(11): 1553 ~ 1561

Transmission Bandwidth of WDM System Using Optical Phase Conjugator for Dispersion Compensation

Shao Zhonghao Zhang Guoqiang Ma Jun

(Department of Communication Engineering , Nanjing University of Posts and Telecommunications , Nanjing 210003)

(Received 5 November 2001 ; revised 20 January 2002)

Abstract : The estimation formula of transmission bandwidth of WDM system using optical phase conjugator (OPC) at the midpoint of standard fiber link for dispersion compensation is derived and verified by numerical simulation. The OPC is asymmetrically accessed in the fiber link to improve transmission bandwidth and the estimation formula of transmission bandwidth affected by OPC accessing position is derived. The results of both estimation and numerical simulation show that the transmission bandwidth of WDM system with OPC at the optimum position is increased nearly by one time as compared to that of WDM system with OPC at the midway.

Key words : transmission bandwidth ; optical phase conjugation ; dispersion compensation ; WDM