

单模光纤中光脉冲啁啾的分析*

吴 芳 蒋泽明 黄肇明

(上海大学嘉定校区电子工程系, 上海 201800)

提要 论述了啁啾光脉冲在单模光纤中传输时啁啾和脉宽的变化, 以及此变化与相应的频谱相位变化的关系, 详细分析了啁啾变化的规律, 并讨论了其物理图像及该规律在光纤通信中的应用, 实验中所获得的脉宽变化与理论计算相符。

关键词 啁啾, 光脉冲, 脉冲传输

1 引 言

众所周知, 无啁啾的光脉冲无论在光纤的正常或反常色散区均会展宽, 红移啁啾脉冲在正常色散区会压缩, 蓝移啁啾在反常色散区会压缩, 反之则展宽。理由很简单, 正常色散区色散与脉冲的红移啁啾相消导致脉冲压缩, 而反常色散区色散与蓝移啁啾相消导致脉冲压缩^[1]。现在我们发现这个概念只在很小的范围内才是正确的。分析与计算显示在大范围内光脉冲在展宽和压缩过程中, 其啁啾变化不是单调的。本文详细分析了啁啾变化的规律, 并讨论了其物理图像及该规律在光纤通信中的应用。实验表明啁啾脉冲的压缩与展宽同理论计算结果符合得相当好。

2 理 论

假定进入光纤的光脉冲为高斯型脉冲, 表示为

$$E_1(t) = E_0 \exp[-(\alpha_1 - j\beta_1)t^2] \exp(+j\omega_0 t) \quad (1)$$

其中 β_1 为初始啁啾量, 脉宽参数 α_1 与脉宽的关系为 $\alpha_1 = 2 \ln 2 / \Delta t^2$, 其傅里叶频谱为

$$E_1(\omega) = \bar{E}_0 \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4} \frac{\alpha_1}{\alpha_1^2 + \beta_1^2}\right] \cdot \exp\left[-j \frac{(\omega - \omega_0)^2}{4} \frac{\beta_1}{\alpha_1^2 + \beta_1^2}\right] \quad (2)$$

其中 \bar{E}_0 为复数振幅。为表示光纤的色散可将传输常数 β 展开

$$\beta = \beta_0 + \dot{\beta}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \ddot{\beta}(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (3)$$

其中 $\dot{\beta} = \left. \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0}$, $\ddot{\beta} = \left. \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \right|_{\omega=\omega_0}$, β 为光纤传输常数。取二阶近似, 则经过距离为 z 的光纤传输, 传递函数 $H(\omega) = \exp(j\beta z - j\beta_0 z)$, 则频谱变为

* 国家自然科学基金和上海市自然科学基金资助项目。

$$E_2(\omega) = \bar{E}_0 \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4} \frac{\alpha_1}{\alpha_1^2 + \beta_1^2}\right] \cdot \exp(+j\phi_\omega) \quad (4)$$

脉冲光场变为^[2]

$$E_2(t) = \bar{E} \exp[-(a_2 - j\beta_2)t^2] \quad (5)$$

其中

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_1}{(1 + \beta_1\rho)^2 + \alpha_1^2\rho^2} \quad (5a)$$

$$\beta_2 = \frac{\beta_1 + (\alpha_1^2 + \beta_1^2)\rho}{(1 + \beta_1\rho)^2 + \alpha_1^2\rho^2} \quad (5b)$$

$$\rho = 2\tilde{\beta}z \quad (5c)$$

$$\phi_\omega = -\left[\frac{\beta_1}{4(\alpha_1^2 + \beta_1^2)} + \frac{1}{2}\tilde{\beta}z\right] \quad (5d)$$

这里 α_2 表征经传输变换过的脉宽 Δt_2 , β_2 代表传输后的啁啾, \bar{E} 为带有时延的复数振幅, ϕ_ω 为 $E_2(t)$ 的傅里叶频谱的二次方频率相位项。

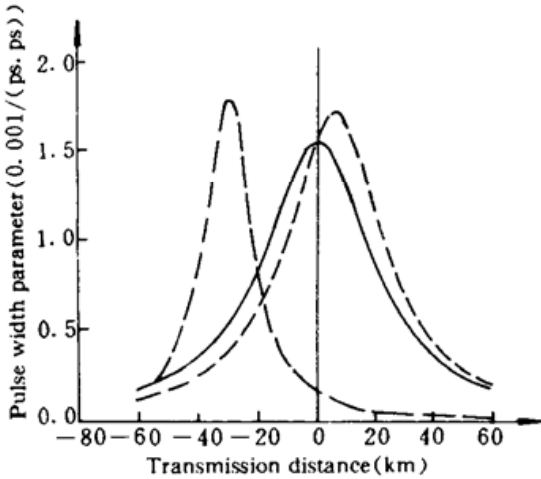


Fig. 1 Pulse width parameter varies with transmission distance

Solid line: $\beta_1 = 0$; Short dashed line: $\beta_1 < 0$;
Long dashed line: $\beta_1 > 0$

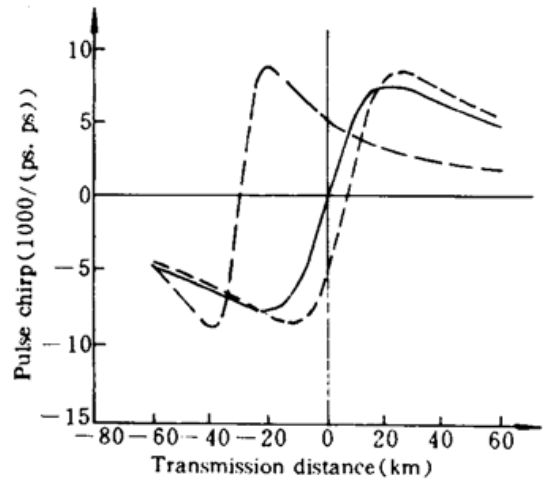


Fig. 2 Pulse chirp varies with transmission distance

Solid line: $\beta_1 = 0$; Short dashed line: $\beta_1 < 0$;
Long dashed line: $\beta_1 > 0$

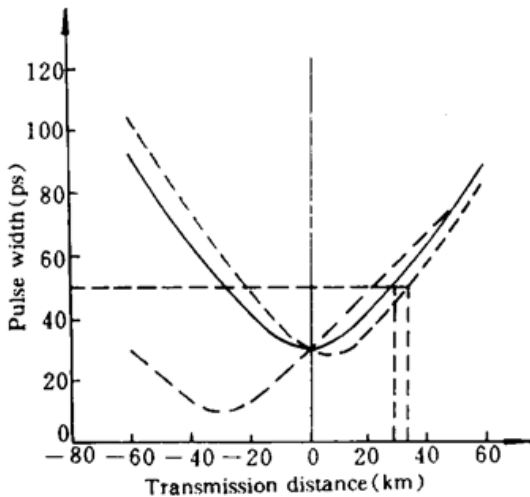


Fig. 3 Pulse width varies with transmission distance

Solid line: $\beta_1 = 0$; Short dashed line: $\beta_1 < 0$;
Long dashed line: $\beta_1 > 0$

令 $\beta_1 = 0$, 亦即以无啁啾的脉冲输入, 则 β_2 随 ρ 变化的曲线如图 2 中实线所示: ρ 的正负分别表示 $\tilde{\beta}$ 的正负, $\rho > 0$ 表示光脉冲沿正常色散光纤 ($\tilde{\beta} > 0$) 传输而 $\rho < 0$ 表示在反常色散 ($\tilde{\beta} < 0$) 光纤中传输。其 α_2 变化曲线如图 1 中实线所示, 脉宽变化曲线如图 3 中实线所示。此时脉冲在正或负色散光纤中传输都会展宽, $\rho = 0$ 点为脉宽最小点。

当输入脉冲带有量值为 β_1 的啁啾时, 以 $\beta_1 > 0$ 和 $\beta_1 < 0$ 为区别, β_2 曲线的零点分别从 $\rho = 0$ 点向左或向右移动, 脉宽最小点也向左或向右移动, 图 1, 图 2, 图 3 中短虚线所示分别为在 $\beta_1 <$

0 情况下脉宽参量、脉冲啁啾与脉宽的变化曲线,可以看出在反常色散光纤中传输时脉宽会先压缩然后展宽,图 1, 图 2, 图 3 中长虚线所示是在 $\beta_1 > 0$ 时的情况,与前者正好反之,在正常色散光纤中传输时脉宽会先压缩然后展宽。

这是因为光脉冲在线性光纤中传输时,光纤色散对光脉冲的作用包括: β_2 引进光脉冲时延; β_2 改变光脉冲频谱的二次方相位,但它不改变传输光脉冲的频谱〔式(3)〕。脉冲频谱由两部分构成——其一是由光脉冲脉宽本身导致的光谱宽度,即变换极限谱宽 $\Delta\nu_0$,对脉宽参数为 α_1 的入射光脉冲有 $\Delta\nu_0 = \sqrt{2\ln 2} \sqrt{\alpha_1}/\pi$;其二是由于光脉冲啁啾而引起的谱宽展宽部分。则入射光脉冲总的谱宽 $\Delta\nu$ 为

$$\Delta\nu = \Delta\nu_0 \sqrt{1 + \frac{\beta_1^2}{\alpha_1^2}} \quad (6)$$

在式(6)中须注意的是在线性光纤中传输时 $\Delta\nu$ 不变,而 $\Delta\nu_0$ 则随着脉宽参数从 $\alpha_1 \rightarrow \alpha_2$ 变化而变化。故啁啾也必须从 $\beta_1 \rightarrow \beta_2$ 变化以保持 $\Delta\nu$ 不变。当光脉冲传输至其频谱中二次方相位 ϕ_w 消失处,时域中复相位(啁啾 β_2)亦变化至零(实数的傅里叶变换为实数),此时变换极限谱宽等于总谱宽, $\Delta\nu_0$ 最宽,光脉冲脉宽最窄。对带有 $\beta_1 > 0$ 或 $\beta_1 < 0$ 啁啾的脉冲,分别在不同色散的光纤中达到 $\phi_w = 0$,于是 β_2 零点和脉宽最小点分别向左或向右移动。我们可以从式(5a), (5b) 和 (5c) 得到此点位置,由 $\partial \alpha_2 / \partial \rho = 0$, $\beta_2 = 0$ 或 $\phi_w = 0$ 得零点的移动量 ρ_z

$$\rho_z = -\frac{\beta_1}{\alpha_1^2 + \beta_1^2} \quad (7)$$

由以上公式可求得脉宽极小值

$$\alpha_{2\min} = \frac{1}{\Delta t_{2\min}} = \frac{\alpha_1^2 + \beta_1^2}{\alpha_1} \quad (8)$$

从 ρ_z 可求得压缩到脉宽最低点的距离 z_{\min} , $z_{\min} = \rho_z / (2\beta)$,对确定的 α_1 和 β_1 脉冲压缩的速率由光纤的色散决定。

当脉冲展宽时,变换极限谱宽 $\Delta\nu_0$ 下降,故啁啾 β_2 的绝对值上升以扩展谱宽〔式(6)〕。但啁啾对谱宽的作用与脉冲宽度有关,啁啾引起的频移为 $\Delta\omega = 2\beta_2 t$ 。当脉宽较小,频移量在相应变换极限谱宽 $\Delta\nu_0$ 范围内时,脉宽展宽时 β_2 绝对值增加从而加大频移量以扩展谱宽;当脉宽逐渐增大至频移量 $\Delta\omega$ 超出相应变换极限谱宽 $\Delta\nu_0$ 范围,则 β_2 绝对值开始逐渐减小以控制总谱宽 $\Delta\nu$ 不变。故 β_2 绝对值变化的转折点可由下式决定

$$2\beta_2 \cdot \frac{\Delta t}{2} = 2\pi\Delta\nu_0 \quad (9)$$

式中,等式左边为在光脉冲半高全宽处由啁啾引入的频移,等式右边为变换极限的谱宽,则得

$$\beta_2 = \alpha_2 \quad (10)$$

等式(10)也可从数学方法得到。由 $\partial \beta_2 / \partial \rho = 0$,得

$$\rho_m = \frac{\pm \alpha_1 - \beta_1}{\alpha_1^2 + \beta_1^2} \quad (11)$$

此时

$$\beta_2 = \alpha_2 = \frac{\alpha_1^2 + \beta_1^2}{2\alpha_1} \quad (12)$$

所以 $\beta_2 = \alpha_2$ 的点就是 β_2 极值点。比较式(8)与式(12)知这一点也是 α_2 曲线的 3dB 下降点。

3 啾啾变化曲线的应用

线性光纤中的传输不改变脉冲的频谱宽度 $\Delta\nu$, 它完全由入射光脉冲的脉宽和啾啾确定, 相同脉宽 (α_1) 情况下, 啾啾 (β_1) 越大, 则光脉冲谱宽越宽。

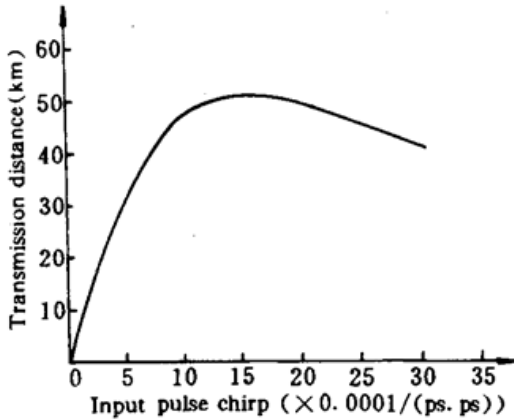


Fig. 4 Transmission distance of minimum pulse width vs input pulse chirp

β_1 为零时, 传输起始点为脉宽最小点, 传输时脉宽单调上升; β_1 不为零时, 在适当色散的光纤中传输时脉宽先压缩后再展宽。利用此特性, 可在光纤通信中延长色散对传输距离的限制。如在图 3 中, 同样的输入脉宽 (30 ps), 啾啾为零 ($\beta_1 = 0$, 实线) 和带红移啾啾 ($\beta_1 < 0$, 短虚线) 的光脉冲脉宽扩展到 50 ps 的传输距离分别约为 29 km 和 34 km, 这个方法称为预啾啾 (Prechirp) 方法。当啾啾 β_1 增加时, 脉宽压缩距离 (零点移动量 ρ_z) 增加, 传输距离的改善也加大。那么 β_1 是否越

大越好呢? 我们来分析 ϕ_w [式 (5d)], 图 4 给出 β_1 增加时, ϕ_w 到达零点的距离 ρ_z 的变化, 可看出当 β_1 增加到 β_{1opt} 时, ρ_z 最大。这是由于 β_1 的上升也同时导致脉冲谱宽上升, 使脉冲压缩速率加快的缘故。即在 $\beta_1 = \beta_{1opt}$ 时, 光脉冲的可传输距最长, β_{1opt} 即最佳预啾啾值, 从式 (7) 由 $\partial \rho_z / \partial \beta_1 = 0$, 得

$$\beta_{1opt} = \alpha_1 \quad (13)$$

因此, 这个最佳预啾啾值正是啾啾曲线极值点上的值, 在这一点上啾啾量等于脉宽平方倒数的 $(2\ln 2)$ 倍 ($1/e$ 脉宽平方的倒数)。设在最佳预啾啾时光脉冲压缩到最小脉宽距离为 z_{max} , 则光脉冲传输到恢复入射脉冲宽度的距离为 $(2z_{max})$, 其中

$$z_{max} = -\frac{1}{4\beta_1\beta} \quad (14)$$

4 数值结果与实验结果比较

实验系统方框图如图 5 所示。

实际实验系统中所用的参数具体为: 一个由梳状波发生器驱动的增益开关 DFB 激光器, 输出 $1.546 \mu\text{m}$ 波长带啾啾的入射光脉冲, 其脉宽 Δt_1 为 32.3 ps, 谱宽为 1.55 nm, 脉冲峰值功率为 1 mW。分别进入正常及反常色散光纤, 正常色散光纤为 10 km, 群色散 $D = -2.49 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$, 而反常色散光纤长度为 10 km, 群色散 $D = 1.23 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ 。由 (5a) 求出的脉宽及实验所得脉宽列入表 1。这里列出的实验测得的脉冲宽度是根据

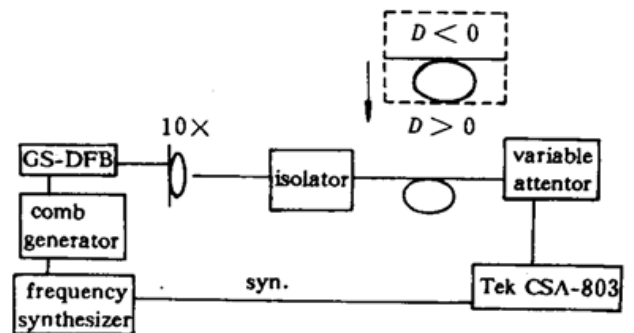


Fig. 5 Experimental setup

CSA-803 信号分析仪上所显示的脉冲宽度, 去除光电探测器的固有谱宽 (20 GHz) 对脉宽值的影响, 并针对入射光脉冲的频谱进行了修正后的结果。

Table 1 Pulse widths (ps) after being compressed and broadened by fibers

Fibers	Calculated	Experimental
Normal dispersion fiber	7.01	6.9
Abnormal dispersion fiber	51.41	51.5

5 结 论

本文讨论了啾啾脉冲在色散光纤中的压缩与展宽,在色散光纤对啾啾脉冲的脉宽展宽或压缩的过程中,脉宽单调变化的区域内,啾啾的变化并非是单调的,它会经历一个极值,该极值处脉宽为最小脉宽的 $\sqrt{2}$ 倍,其啾啾量正好等于 $(1/e)$ 脉宽倒数的平方。传输过程中谱宽保持不变。色散通过改变脉冲频谱的相位来改变脉宽和啾啾。通过控制入射光脉冲的啾啾可改善光纤通信中色散对传输距离的限制。

参 考 文 献

- 1 曹文华 等. 单模光纤中皮秒啾啾脉冲的压缩. 光学学报, 1995, 15(2): 180
- 2 董孝义. 光波电子学. 天津: 南开大学出版社, 1987. 655
- 3 许宝西 等. F-P 滤波窗在半导体光孤子源的应用. 光学学报, 1994, 14(10): 1063

Chirp Analysis for Optical Pulse Transmission in Single-mode Fibers

Wu Fang Jiang Zeming Huang Zhaoming

(Department of Electronic Engineering, Jiading Campus of Shanghai University, Shanghai 201800)

Abstract This paper discussed the variance of chirp and width of the optical pulse and the relation between the variance of chirp and spectral phase as the chirped optical pulse were transmitted in single mode fibers. The physical meanings of chirp variance and its application in optical fiber communication are presented. The experimental results of pulse width variance in normal and anomalous dispersion fibers were fitted well with theoretical results.

Key words chirp, optical pulse, optical pulse transmission