

光纤通信中光孤子传输的非线性问题*

李齐良^{1,3} 陈向东² 唐向红³ 林理彬¹ 刘贵昂⁴ 王 慧⁴ 喻起林⁵

- ¹ 四川大学物理学院, 成都 610064
- ² 电子科技大学 15 系, 成都 610054
- ³ 杭州电子工业学院通信工程分院, 杭州 310037
- ⁴ 广东湛江海洋大学, 湛江 5240088
- ⁵ 贵州省数据通信局, 贵阳 550000

提要 研究了光纤通信中存在损耗的时候,光孤子的幅度随传距离 z 的变化关系,结果得出光孤子的幅度随距离呈指数衰减。

关键词 非线性, 光孤子, 色散

中图分类号 TN012 **文献标识码** A

Nonlinear Problem in Soliton Transmission of Optical Communication

LI Qi-liang^{1,3} CHEN Xiang-dong² TANG Xiang-hong³ LIN Li-bin¹
LIU Gui-ang⁴ WANG Hui⁴ YU Qi-lin⁵

- ¹ Physics Institute of Sichuan University, Chengdu 610064
- ² The 15th Department of University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054
- ³ Communication College of Hangzhou Institute of Electronic Engineering, Hangzhou 310037
- ⁴ Zhanjiang Ocean University, Zhanjiang 524088
- ⁵ Digital Communication Authority of Guizhou, Guizhou 550000

Abstract It is studied that the soliton amplitude varies with respect to the distance z of soliton transmission, when there is loss in optical fiber. The result is that the soliton amplitude declines exponentially to the distance z .

Key words nonlinearity, soliton, dispersion

1 引 言

光纤中具有轻微的非线性和一定的色散特性。这两种特性分开来说,将会损害光纤通信中系统的性能,但是在一定的条件下,这种小的非线性的影响可以抵消色散的影响,产生孤子。在无耗的光纤介质中,孤子可以传输任意距离而不改变形状。实际的有耗光纤中,为了使用孤子,用光放大器来抵消光纤的损耗,以维持整个链路上孤子能量的稳定。

目前流行的光放大器有半导体放大器^[1]和掺铒光纤放大器(EDFAs),半导体放大器体积小,成本相对较低,集成性好。掺铒光纤放大器中铒离子发射的光位于光纤损耗最小的 1.55 μm 带区,圆形的光纤放大器系统与光纤系统天然地兼容,是长距离越洋

通信的理想关键器件。

在光纤放大器中需要另外两个元件:光滤波器和光隔离器,用来限制自发辐射噪声(ASE)和防止 ASE 反射^[2]。

2 理 论

通常在光纤中非线性和色散效应都比较弱,对光纤的作用表现为两种效应的相加性,无噪声源无损耗时,沿 z 轴的传输非线性薛定谔(NLSE)方程为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} + \beta_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{j}{2} \beta_0 \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - j \frac{n_2}{n_0} \beta |\phi|^2 \phi \quad (1)$$

式中 β 为传播常数。只要光纤中非线性和色散效应都比较强,上式是成立的。引入无量纲的变量:

$$T = \frac{1}{\tau} (t - \beta_0 z) \quad \text{和} \quad Z = \frac{|\beta_0|}{\tau^2} z$$

* 博士后基金资助课题。

和归一化包络函数:

$$u(Z, T) = \tau \left(\frac{n_2 \beta_0}{n_0 |\beta_0|} \right)^{1/2} \phi$$

τ 为孤子的 FWHM 宽度。这样传输方程可以写成非线性薛定谔(NLSE):

$$\frac{\partial u}{\partial Z} = \frac{j}{2} \frac{\beta_0}{|\beta_0|} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} - j |u|^2 u \quad (2)$$

这个方程有无穷多阶孤子解。

光纤中有损耗时,上述方程多一损耗项,变为:

$$\frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{j}{2} \frac{\beta_0}{|\beta_0|} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + j |u|^2 u = -2 \frac{\alpha}{2} \frac{\tau^2}{|\beta_0|} u \quad (3)$$

孤子受光纤损耗机制而衰减,孤子的空间长度:

$$z_0 \equiv \frac{\pi}{2} \frac{\tau^2}{|\beta|}$$

3 计算和讨论

在理想无耗光纤中,孤子传输方程(2)的解为:

$$\phi(z, t) = \left(-\frac{n_0}{n_2} \frac{\beta_0}{\beta_0 \tau^2} \right)^{1/2} \exp\left(j \frac{\beta_0}{2\tau^2} z\right) \operatorname{sech}\left(\frac{t - \beta_0 z}{\tau}\right)$$

光孤子的振幅为 $|\phi_0|^2 = -\frac{n_0}{n_2} \frac{\beta_0}{\beta_0 \tau^2}$, 表明它只由非线性因子 n_2 , 色散因子 β_0 和脉冲宽度 τ 决定, 传输时, 其形状和宽度保持不变, 且只有在 $\beta_0/n_2 < 0$ 时, 才能产生光孤子。

光纤中存在损耗时, 光纤中的非线性不足以抵消色散效应, 传输方程为(3), 其解为

$$\begin{aligned} \phi(z, t) = & \left(-\frac{n_0}{n_2} \frac{\beta_0}{\beta_0 \tau^2} \right)^{1/2} \exp\left(-2 \frac{\Gamma |\beta_0|}{\tau^2} z\right) \times \\ & \exp\left\{-\frac{j}{8\Gamma} \left[1 - \exp\left(-4 \frac{\Gamma |\beta_0|}{\tau^2} z\right)\right]\right\} \times \\ & \operatorname{sech}\left[\frac{t - \beta_0 z}{\tau} \exp\left(-2 \frac{\Gamma |\beta_0|}{\tau^2} z\right)\right] \end{aligned}$$

光孤子的振幅为

$$\phi(z, t) = \left(-\frac{n_0}{n_2} \frac{\beta_0}{\beta_0 \tau^2} \right) \exp\left(-4 \frac{|\beta_0|}{\tau^2} z\right)$$

这里

$$\Gamma = \frac{\alpha}{2} \frac{\tau^2}{|\beta_0|}$$

它随距离 z 呈指数衰减。如果假定初始孤子的振幅为 1, $\alpha = 0.0576 \text{ km}^{-1}$ (0.245 dB/km), 孤子幅度随 z 的变化关系如图 1 所示, 随距离呈指数衰减的关系, 表明要实现远距离通信, 必须使用光放大器来抵消孤子能量的损耗。使用光放大器时, 将产生自发辐射噪声, 引起到达时间的抖动。

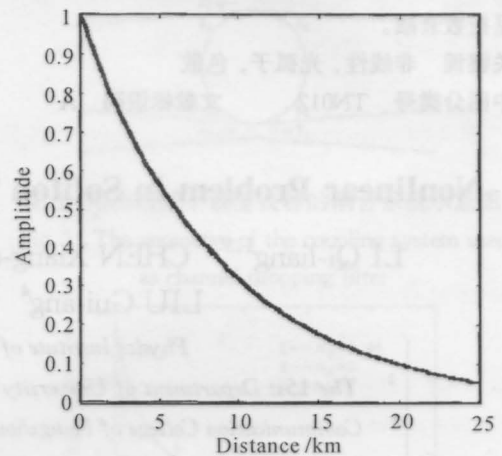


图 1 孤子的幅度随距离 z 的变化关系

Fig. 1 Relationship of soliton amplitude vs distance

参 考 文 献

- 1 E. A. Golovchenko, A. N. Pilipetskii *et al.*. Soliton propagation with up- and down-sliding-frequency guiding filters. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(6): 539~541
- 2 Antonio Mecozzi. Soliton transmission control with semiconductor amplifiers. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(15): 1616~1618