

随机增益对分布放大孤子通信系统的影响及抑制*

李 宏** 杨祥林

(东南大学电子工程系 南京 210018)

提要 基于分布放大光孤子通信系统中增益补偿损耗过程中存在不可忽略的随机效应,研究了随机增益对光孤子通信系统的影响。结果表明:随机增益引起孤子到达时间的抖动,其方差与传输距离的三次方成正比,从而降低了孤子传输系统的通信容量;利用滤波器可以较好地抑制随机增益对孤子系统的影响。

关键词 光孤子通信系统,随机增益,孤子到达时间抖动

1 引 言

光孤子通信以稳定的光孤子脉冲作为信息载体,完全摆脱了光纤色散对信号传输码率的限制,是一种未来的高速长距离的全光通信优选方案。光孤子脉冲在光纤中长距离传输时,需要用放大器来周期性地补偿光纤损耗,而放大器在放大补偿光纤损耗的同时,也产生了自发辐射噪声,引起了光孤子频率随机走移,限制光孤子长距离通信容量(G-H 效应)^[1],为了降低 G-H 效应,研究人员已提出了时域控制和频域滤波等方法,改善了光孤子长距离通信容量^[2,3]。

随机扰动是孤子通信系统中一种重要的随机过程,它们对孤子传输系统会产生不良的影响,如增大了光孤子脉冲到达时间抖动方差,降低了系统的通信容量^[4-7]。随机增益一般认为仅对孤子的振幅有影响,而对孤子的速度无影响^[8]。

分布式掺铒光纤放大器(D-EDFA)具有增益平稳、频带宽、噪声低、功率大、结构简单、使用方便等优点,信号在整个传输过程中得到放大,其幅值起伏较小,并始终保持相对高的功率水平、较低的放大器自发辐射(ASE)噪声和较高的信噪比,是一种理想的放大器^[9,10]。利用这种低增益掺杂铒离子的色散位移光纤可以将飞秒光孤子进行长距离传输,大大提高了孤子通信系统码率(大于 100 Gb/s)。光纤通信系统中采用这种分布式光放大器的目的是为了补偿光纤损耗,实现长距离输入和输出的透明传输,但在光孤子传输放大中,增益并不是处处等于光纤损耗,它们之间的差(纯增益)近似是一种随机涨落。

本文从分布放大光孤子传输系统的实际情况出发,在文献[8]的基础上,重新建立随机增

* 国家自然科学基金资助项目。

** 联系单位:湖北师范学院物理系。

收稿日期:1996-10-15;收到修改稿日期:1997-03-07

益模式, 利用动量守恒和能量守恒扰动法, 研究了随机增益引起的光孤子脉冲到达时间抖动方差, 及在传输线中周期性地插入滤波器来抑制到达时间的抖动。

2 理论分析

2.1 随机增益引起的光孤子脉冲到达时间抖动方差

光纤中光孤子脉冲传输一般采用如下的非线性薛定谔方程来描述

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = i \delta u \quad (1)$$

式中, u 为无量纲场包络函数, $\xi = z/L_D$, $\tau = t/T_0$, $L_D = T_0^2 |k^{(2)}|$ 为色散长度, T_0 为脉宽, $\delta = (g - \Gamma)$ 为系统的纯增益, g, Γ 分别为光纤平均增益、损耗。

孤子通信系统中采用光纤放大器的目的是为了补偿光纤损耗, 实现透明传输, 而采用的光纤放大器, 由于工艺、制作上的差异, 长距离传输中不可能正好补偿光纤损耗, 增益是有随机涨落的。我们在文献[8]中, 研究了增益沿传输方向的随机涨落对光孤子传输系统的影响, 认为增益

$$g = g_0 + \alpha_1(\xi) \quad (2)$$

其中, g_0 为系统传输线中的平均增益, $g_0 = \Gamma$, $\alpha_1(\xi)$ 是增益沿传输方向的随机涨落, 得到了随机增益仅对孤子的振幅有影响, 而对孤子的速度无影响的结果。经过进一步研究分析, 认为当使用分布式掺铒光纤放大器来补偿传输系统的损耗时, 增益不仅是传输长度 ξ 的函数, 也应与频率 $\omega - \omega_0$ 有关^[11] (如沿传输方向掺杂不均匀, 引起折射率涨落, 导致 ω 是传输长度 ξ 的隐函数), 这样传输长度 ξ 改变 $\Delta\xi$ 时, 增益更合理的表达式为

$$g(\xi + \Delta\xi, \omega - \omega_0) = g_0 + \frac{\partial g}{\partial \xi} \Delta\xi + \frac{\partial g}{\partial \omega} (\omega - \omega_0) \quad (3)$$

其中, ω_0 为光孤子中心频率。方程(3)右边第二项等价于文献[8]中的随机增益项 $\alpha_1(\xi)$, 第三项等价于

$$\frac{\partial g}{\partial \omega} (\omega - \omega_0) \rightarrow i \alpha_2(\xi, \omega - \omega_0) \frac{\partial}{\partial \tau} \quad (4)$$

其中 $\alpha_2(\xi, \omega - \omega_0)$ 是随机量。

方程(1)可以写为

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = i \alpha_1 u - \alpha_2 \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (5)$$

其中随机量 $\alpha_i(\xi)$ ($i = 1, 2$) 满足

$$\begin{aligned} \langle \alpha_i(\xi) \rangle &= 0 \quad (i = 1, 2) \\ \langle \alpha_i(\xi) \alpha_i(\xi') \rangle &= 2H_i \delta(\xi - \xi') \\ \langle \alpha_1(\xi_1) \cdots \alpha_1(\xi_n) \rangle &= \begin{cases} 0 & n = \text{odd} \\ (2H_i)^n \sum_{p,d} \delta(\xi_1 - \xi_2) \cdots \delta(\xi_{n-1} - \xi_n) & n = \text{even} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 H_i 为 α_i 均方涨落的测量值, $H_i = 0$ 表示传输系统的无随机增益。

不包含随机扰动的非线性薛定谔方程(5)的解可表示为

$$u(\xi, \tau) = \eta \operatorname{sech}[\eta(\tau + k\xi)] \exp[-ik\tau + i(\eta^2 - k^2)\xi] \quad (7)$$

其中 η, k 分别表示孤子的振幅和速度, 随机效应作为扰动, 使 η, k 随 ξ 缓变, 由动量守恒和能量

守恒扰动法, 可得下列演化关系

$$\begin{aligned} \frac{d\eta}{d\xi} &= 2\alpha_1\eta + 2\alpha_2k\eta \\ \frac{dk}{d\xi} &= \frac{2}{3}\alpha_2\eta^2 \end{aligned} \quad (8)$$

由方程(8)可知, 随机增益不仅对孤子的振幅有影响, 而且还对孤子的速度有影响, 这个结果与文献[8]完全不同。

把随机增益当作扰动, 不影响方程(5)的平衡点 $(\eta, k) \rightarrow (\eta_0, 0)$, k, α_2 相对较小, 方程(8)可以近似为

$$\frac{d\eta}{d\xi} = 2\alpha_1\eta \quad (9a)$$

$$\frac{dk}{d\xi} = \frac{2}{3}\alpha_2\eta^2 \quad (9b)$$

将孤子速度方程在平衡点 $(\eta_0, 0)$ 线性展开

$$\frac{dk}{d\xi} = \frac{2}{3}\alpha_2\eta_0^2 \quad (10)$$

其中 k 为光孤子速度偏移平衡点 $(\eta_0, 0)$ 的偏移量。

由式(10), 利用 $d\tau/d\xi = k(\xi)$, 可得随机增益引起的光孤子脉冲到达时间抖动方差

$$\delta\tau^2(\xi) \approx \frac{16\eta_0^4 H^2}{27} \xi^3 \quad (11)$$

显然, 随机增益引起的光孤子脉冲到达时间抖动方差与传输长度 ξ 、 α_2 均方涨落的测量值 H^2 有关, 且与传输距离 ξ 的三次方成正比, 随机增益降低了孤子通信系统的容量。

2.2 随机增益引起的光孤子脉冲到达时间抖动的抑制

为了削弱随机增益引起的光孤子脉冲到达时间抖动, 可采用在传输线上周期性安插滤波器来实现。引入滤波器后, 系统的传输方程为

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = i\alpha_1 u - \alpha_2 \frac{\partial u}{\partial \tau} + i\beta \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} \quad (12)$$

其中 β 为滤波器二阶效应。

方程(12)右边各项当作扰动, 由动量守恒和能量守恒扰动法可得

$$\frac{d\eta}{d\xi} = 2\alpha_1\eta - 2\beta \left[\frac{1}{3}\eta^3 + k^2\eta \right] \quad (13a)$$

$$\frac{dk}{d\xi} = \frac{2}{3}\alpha_2\eta^2 - \frac{4}{3}\beta\eta^2 k \quad (13b)$$

将方程(13b)在平衡点 $(\eta_0, 0)$ 处线性展开

$$\frac{dk}{d\xi} = \frac{2}{3}\alpha_2\eta_0^2 - \frac{4}{3}\beta\eta_0^2 k \quad (14)$$

k 为孤子速度偏移量, 方程(14)有解

$$k(\xi) = \frac{2}{3}\eta_0^2 \exp(-\mu\xi) \int_0^\xi \alpha_2(x) \exp(\mu x) dx \quad (15)$$

其中, $\mu = \frac{4}{3}\beta\eta_0^2$ 。

令 $\Phi(x, y) = \exp\left[\int_y^x \mu \alpha_2(x_1) dx_1\right]$, 则 $\Phi(x, y)$ 满足以下关系^[6]

$$\begin{aligned} \langle \exp[\Phi(x, y)] \rangle &= \exp[(n\mu)^2 H_2(x - y)] \\ \langle \exp[\Phi(x, y) + \Phi(x', y')] \rangle &= \exp\{\mu^2 H_2[2(x + x' - y - y') - |x - x'| - |y - y'|]\} \\ \langle \alpha_2(y) \exp[-\Phi(x, y)] \rangle &= \mu H_2 \exp[\mu^2 H_2(x - y)] \\ \langle \alpha_2(y) \alpha_2(y') \exp\{[-\Phi(x, y) - \Phi(x', y')]\} \rangle &= \left[2H_2 \delta(y - y') + \frac{\partial^2}{\partial y \partial y'} \right] \times \\ &\quad \exp\{\mu^2 H_2[2(x + x' - y - y') - |x - x'| - |y - y'|]\} \end{aligned} \tag{16}$$

由式(15), (16)可求得

$$\begin{aligned} \langle k(\xi) \rangle &= 0 \\ \langle k(\xi) k(\xi') \rangle &= \frac{8\eta_0^4 H_2}{9\mu} \{ \exp(-\mu|\xi - \xi'|) - \exp[-\mu(\xi + \xi')] \} \end{aligned} \tag{17}$$

相应的时间抖动方差为

$$\langle \delta\tau^2(\xi) \rangle = \iint_{00}^{\xi\xi} \langle k(\xi) k(\xi') \rangle d\xi d\xi' = \frac{16\eta_0^4 H_2}{27} \xi^3 f(\xi) \tag{18}$$

其中
$$f(\xi) = \frac{3}{2\mu^3 \xi^3} [2\mu\xi - 3 + 4\exp(-\mu\xi) - \exp(-2\mu\xi)] \tag{19}$$

为滤波器对光孤子脉冲到达时间抖动减少因子。

3 结果与讨论

在集总放大孤子传输系统中, 光孤子脉冲增益的随机变化仅对孤子的振幅有影响, 而对孤子脉冲的速度无影响^[8], 因此它的影响比色散随机变化对孤子传输系统的影响要小^[4]。而在分

布放大孤子传输系统中, 随机增益不仅对孤子的振幅有影响, 而且还对孤子的速度有影响, 它的影响与色散随机变化对孤子传输系统的影响一样不可忽略^[7], 因此在分布放大孤子传输系统中, 光孤子脉冲增益起伏不能大, 否则光孤子脉冲的功率涨落大, 会对高码率长距离的孤子传输系统的稳定性产生危害性影响。文献[12]在研究了分布放大长距离传输系统中孤子传输时, 通过选择铒纤色散、掺杂浓度及泵浦功率等参数, 使得光孤子脉冲的功率起伏控制在2%左右。为了讨论随机增益对光孤子传输系统的影响及滤波器的抑制作用, 这里我们假设随机增益的均方涨落的测量值 $H_2 = 10^{-6}$, 光孤子的振幅 $\eta_0 = 1$, 滤波器的二阶效应 $\beta = 0.05$ 和 0.1 。

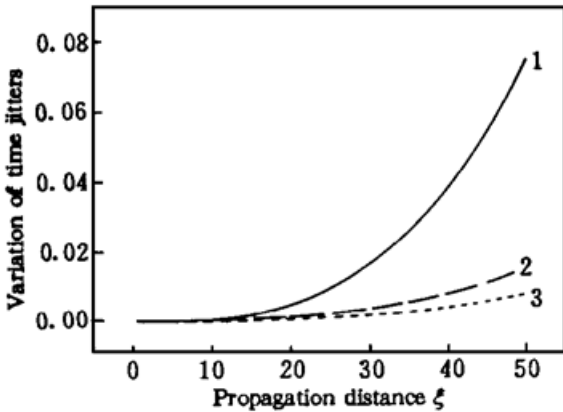


图1 孤子传输系统中由随机增益引起的到达时间抖动方差随传输距离的变化关系

1: 传输线中没有安插滤波器。2: 传输线中周期性地安插了滤波器, 且 $\beta = 0.05$ 。3: 传输线中周期性地安插了滤波器, 且 $\beta = 0.1$

Fig. 1 The variation of time jitters versus propagation distance caused by stochastic gain in the soliton transmission system

1: there are no filters in the transmission line. 2: there are filters in the transmission line, $\beta = 0.05$. 3: there are filters in the transmission line, $\beta = 0.1$

图1是分布放大孤子传输系统中, 随机增益产生的光孤子脉冲到达时间的抖动方差随传输距离的变化关系。当传输线中没有安插滤波器, 随机增益引起的光孤子脉冲到达时间的抖动方差随传输距离增长很快, 它与传输距离的三次方成正比,

这对长距离传输的分布放大孤子传输系统十分有害, 将严重影响到孤子系统的通信能力。当传输线中周期性地安插了滤波器, 随机增益引起的光孤子脉冲到达时间的抖动方差随传输距离增长很慢, 它近似与传输距离的一次方成正比, 并且始终保持较低水平, 当滤波器的强度增加时, 滤波器的抑制作用越明显, 这对长距离传输的分布放大孤子传输系统十分有利。

参 考 文 献

- 1 J. P. Gordon, H. A. Haus. Random walk of coherently amplified solitons in optical fiber transmission. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(10) : 665~ 667
- 2 A. Mecozzi, J. D. Moores, H. A. Haus. Soliton transmission control. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(9) : 1841 ~ 1843
- 3 D. Marcuse. Simulation to demonstrate reduction of the G-H effect. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(1) : 34~ 36
- 4 杨祥林, 温扬敬, 张明德. 光纤随机色散对孤子系统通信容量的影响及抑制. *中国科学(A)*, 1995, **25**(5) : 544~ 549
- 5 温扬敬, 陈明华, 张明德 等. 脉冲频率漂移对孤子传输系统的影响. *科学通报*, 1995, **40**(6) : 1047~ 1050
- 6 J. N. Elgin. Stochastic perturbations of optical solitons. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1) : 10~ 12
- 7 Li Hong, Yang Xianglin. Influence of stochastic dispersion variation on bright soliton transmission system. *Chinese J. of Lasers*, 1997, **B6**(3) : 269~ 274; 李 宏, 陈明华, 杨祥林. 随机高阶效应对孤子传输系统的影响. *中国激光*, 1997, **A24**(6) : 531~ 535
- 8 Wen Yangjing, Chen Minghua, Zhang Mingde *et al.*. The fiber soliton communication system with stochastic variation of gain. *Chinese J. of Lasers*, 1995, **B4**(6) : 241~ 246
- 9 C. R. Giles, E. Desurvire. Propagation of signal and noise in concatenated erbium-doped fiber optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **LT-9**(2) : 147~ 154
- 10 李 宏, 陈海涓, 杨祥林. 沿传输方向渐变掺杂分布式掺铒光纤放大器模型. *通信学报*, 1996, **17**(5) : 82 ~ 87
- 11 D. Shenoy, A. Puri. Compensation for the soliton self-frequency shift and the third-order dispersion using bandwidth-limited optical gain. *Opt. Commun.*, 1995, (1) : 401~ 406
- 12 S. Wen, S. Chi. Undoing of soliton interaction by optical phase conjugation. *Electr. Lett.*, 1994, **30**(8) : 663~ 664

Influence of Stochastic Gain Effect on the Soliton Communication System and Its Suppression

Li Hong Yang Xianglin

(Department of Electronics Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract Based on the fact that there are unnegligible stochastic effects in the compensation of gain for the loss in the soliton communication system, the influence is studied of stochastic gain on the soliton transmitting system. The results show that the stochastic gain leads to the arrival time jitters, the variation of which is proportional to the cube of the propagation distance, and reduces the capacity of the system. The influence can be suppressed well by filters.

Key words soliton communication system, stochastic gain, time jitters