

文章编号: 0258-7025(2010)04-1033-04

多跨距非线性光纤链路中基于微扰理论的优化方法

向 练 李 虎 张 晓 萍

(兰州大学信息科学与工程学院现代通信技术研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要 通过微扰理论求得非线性薛定谔方程(NLSE)的时域半解析解, 在非线性效应增大的情况下提出了优化微扰方法(MPM), 并在多跨距非线性光纤链路中与原微扰方法(PM)进行了对比仿真研究。研究表明, 优化微扰方法在非线性效应增强的情况下精确度明显高于原微扰方法, 同时又不失其半解析模型, 为研究大功率长距离传输的光纤通信系统提供了新的方法。

关键词 光纤通信; 非线性效应; 微扰理论; 非线性薛定谔方程

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.1033

Modified Perturbation Method for Multi-Span Nonlinear Fiber

Xiang Lian Li Hu Zhang Xiaoping

(Institute of Modern Communication Technology, School of Information Science and Engineering,
Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract A time-domain semi-analytical solution of nonlinear Schrödinger equation (NLSE) was obtained by using perturbation method (PM). And a modified perturbation method (MPM) was brought forward with the increase of nonlinearity. The numerical simulations of its applications in a high-speed nonlinear fiber-optic system, which is made up of multi-span each including one transmission fiber, one dispersion compensation fiber and an erbium doped fiber amplifier, proves that the MPM give a more precise semi-analytical solution of NLSE, which provides a novel solution to study the high-speed long-haul fiber-optic system.

Key words fiber communications; nonlinear effect; perturbation theory; nonlinear Schrödinger equation

1 引 言

光脉冲在光纤中的传输演化过程可以用非线性薛定谔方程(NLSE)来描述。通常 NLSE 不适于解析求解, 主要采用分步傅里叶等数值方法来求解^[1~4], 但数值方法不利于分析光脉冲在传输演化过程中光纤色散和非线性对其的影响, 所以无法借助数值方法求解 NLSE 来寻找消除非线性效应对光脉冲影响的方法, 尤其是在需要考虑信道内非线性效应的高速大容量光纤通信系统中^[5,6]。K. V. Peddannragari 等^[7,8]提出了基于沃特拉级数理论(Volterra series theory)的 NLSE 的频域半解析闭式近似解。Lee^[9]应用微扰理论来分析光纤通信系统, 得到了 NLSE 的时

域半解析近似解, 并与沃特拉级数理论进行了对比。然而随着大容量长距离光纤通信系统的发展, 系统所要求的大输入脉冲功率将引起光纤中非线性效应的显著增长^[10], 上述半解析方法会带来较大的误差, Xu^[11]在非线性效应增大的情况下提出了频域的优化沃特拉级数方法, 提高了其精确度。然而频域的半解析方法不能很好地描述带内非线性效应, 同时也不利于直观分析光脉冲在光纤中的传输演化过程。本文通过微扰理论求出 NLSE 的时域半解析近似解, 在非线性效应增大的情况下提出了时域的优化微扰方法(MPM), 并在多跨距非线性光纤链路中与原微扰方法(PM)进行了模拟仿真对比。

收稿日期: 2009-05-27; 收到修改稿日期: 2009-07-07

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0981)资助课题。

作者简介: 向 练(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光波技术与宽带通信等方面的研究。E-mail: xianglian119@163.com

导师简介: 张晓萍(1961—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信系统及光电技术等方面的研究。

2 NLSE 的优化微扰解

研究光纤链路中光脉冲的变化关系,需解 NLSE^[1]

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

式中 A 为光脉冲慢包络振幅, α 为衰减系数, β_2 为二阶色散因子, γ 为非线性系数。由于 γ 很小, 根据微扰理论, 可把它看成微扰项, 设出时域微扰解^[9]

$$A(z, t) = A_0(z, t) + \gamma A_1(z, t) + \gamma^2 A_2(z, t) + \dots, \quad (2)$$

把(2)式代入(1)式, 即可推导出各阶微扰解所满足的耦合非齐次线性方程, 经推导可得

$$A_0(z, t) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ x(\omega) \exp \left[-z \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{j\beta_2 \omega^2}{2} \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

$$A_1(z, t) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ - \int \mathcal{F} [jA_0(z, t) |A_0(z, t)|^2] * \exp \left(\frac{\alpha z}{2} + \frac{j\beta_2 \omega^2 z}{2} \right) dz * \exp \left[-z \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{j\beta_2 \omega^2}{2} \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

式中 $\mathcal{F}(x)$ 表示傅里叶变换, $\mathcal{F}^{-1}(x)$ 表示傅里叶反变换, $x(\omega)$ 表示输入脉冲频域表达式。

由于 $A(z, t)$ 是无穷阶微扰解的和, 在实际应用中必须对其进行截取。高阶微扰项的舍去必然会带来计算误差。以 40 Gb/s 光纤传输系统为例, 光纤各参数取常规单模色散光纤(SMF)标准值, 脉冲峰值功率为 20 mW, 传输距离为 100 km, 一阶微扰解析解与分步傅里叶数值解(SSFM)之间的误差值仅为 3.32×10^{-4} , 然而随着非线性效应增大, 上述误差也会增大, 因此对原微扰方法进行优化, 提高计算精度。设原微扰解为

$$A(z, t) \approx A_L(z, t) + A_{NL}(z, t), \quad (5)$$

式中 $A_L(z, t) = A_0(z, t)$ 为线性项, $A_{NL}(z, t)$ 为非线性项, 取一阶微扰解时 $A_{NL}(z, t) = \gamma A_1(z, t)$ 。为了补偿舍去的微扰项所带来的误差, 对原微扰解进行修正

$$A(z, t) = \begin{cases} A_L(t, z) \exp \left[\frac{A_{NL}(t, z)}{A_L(t, z)} \right], & |A_{NL}(t, z)| < |A_L(t, z)| \\ A_L(t, z) + A_{NL}(t, z), & |A_{NL}(t, z)| \geq |A_L(t, z)| \end{cases}, \quad (6)$$

取一阶优化微扰解时 $A_{NL}(z, t) = \gamma A_1(z, t)$ 。通常 $|A_{NL}(t, z)| \ll |A_L(t, z)|$, 但在脉冲上升和下降边缘, $|A_L(z, t)|$ 和 $|A_{NL}(z, t)|$ 均趋近于零, 为避免 $\frac{A_{NL}(t, z)}{A_L(t, z)}$ 除数为零, 在 $|A_{NL}(t, z)| \geq |A_L(t, z)|$ 时保留原微扰解的形式。

3 优化微扰方法和微扰方法仿真比较结果

为验证优化微扰算法在分析光纤通信系统时的优化效果, 对原微扰方法和优化微扰方法均取一阶解, 并在 40 Gb/s 多跨距非线性光纤传输系统中做数值模拟。链路中的每个跨距由 50 km 单模色散光纤(SMF), 50 km 色散补偿光纤(DCF)和一个掺铒光纤放大器(EDFA)组成, 如图 1 所示。设放大器的放大增益(G)刚好能补偿该跨距内的光纤损耗, 并设 DCF 的损耗和非线性值与 SMF 相同, 色散值与 SMF 相反。

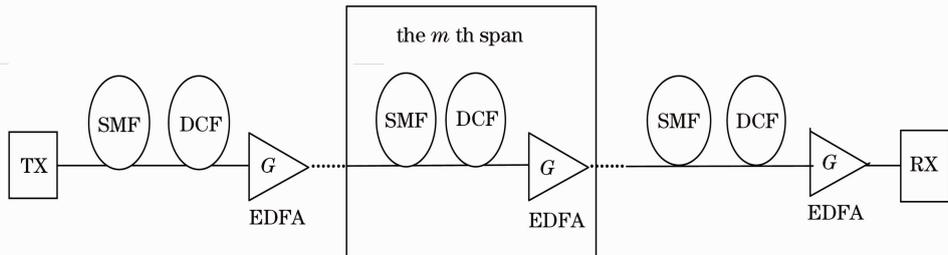


图 1 长距离多跨距光纤通信系统示意图

Fig. 1 Sketch of long-haul multi-span optical fiber communication system

分别采用一阶优化微扰方法、一阶原微扰方法和分步傅里叶方法模拟计算出结果, 为比较它们的接近程度, 定义归一化能量偏差(NSD, 设为 N_{NSD})^[9~11]

$$N_{NSD}(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |U_A(z, t) - U_B(z, t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |U(0, t)|^2 dt}, \quad (7)$$

式中 $U_A(z, t)$ 代表采用 PM 和 MPM 计算得到的输出脉冲, $U_B(z, t)$ 代表采用 SSFM 计算得到的输出脉冲, $U(0, t)$ 为输入脉冲. 设系统中传输单个高斯光脉冲, 它的 $1/e$ 强度点半峰全宽 $T_0 = 25$ ps, 峰值功率 $P_0 = 10$ mW. 系统参数设置为二阶色散系数 $\beta_2 = -18$ ps² · km⁻¹, 衰减系数 $\alpha = 0.2$ dB · km⁻¹, 非线性系

数 $\gamma = 2$ W⁻¹ · km⁻¹, 传输距离 $S = 500$ km.

光脉冲分别传输了 100 km 和 500 km 后, 采用 SSFM, MPM 和 PM 模拟计算出的输出波形如图 2(a) 和 (b) 所示, 可以看出采用 MPM 模拟计算出的输出波形跟 SSFM 模拟计算出的输出波形更贴近, 因此 MPM 要优于 PM.

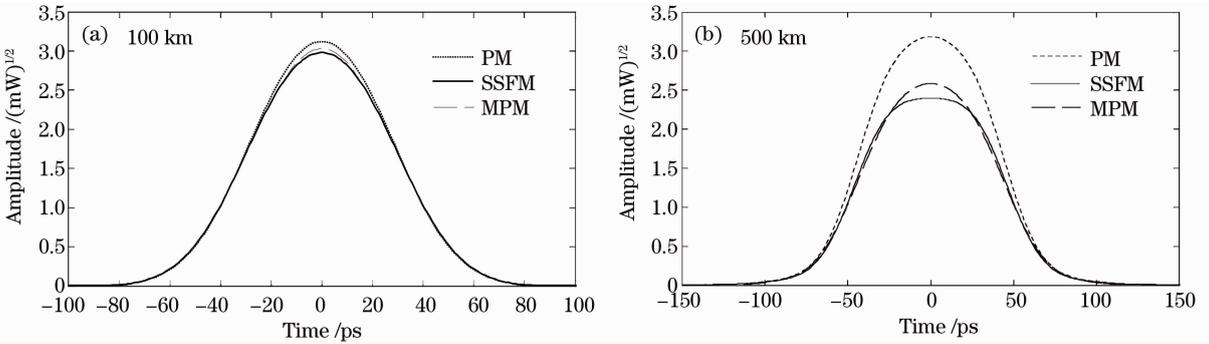


图 2 光脉冲传输不同距离后的输出波形图

Fig. 2 Output pulse with the different transmission distances

为了进一步论证提出的优化微扰方法的精确性, 根据 (7) 式计算了单个高斯脉冲分别在传输距离 S , 输入脉冲峰值功率 P_0 和 γ 不同的情况下, MPM 与 PM 比较的 NSD 曲线, 如图 3(a), (b) 和 (c) 所示. 为使区别明显, 图中均对 NSD 取对数值. 由

图 3(a), (b) 和 (c) 中的曲线可以看出随着 S, P_0 和 γ 的不断增大, 非线性效应不断积累增大, MPM 和 PM 的误差都在增大, 但 MPM 的误差值和误差增大的速率明显小于 PM, 因此 MPM 在大功率高非线性长距离传输的光纤链路分析中要优于 PM.

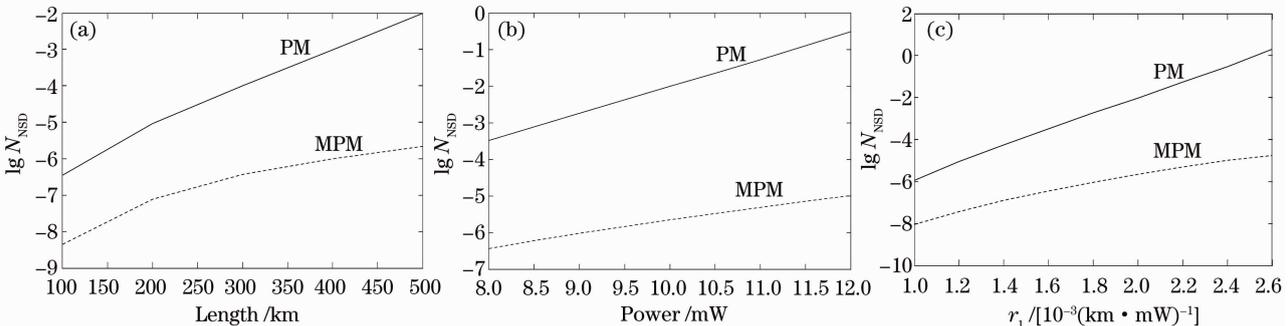


图 3 MPM 和 PM 的 NSD 曲线图

Fig. 3 Relation curve of NSD using MPM and PM

同样可以验证原微扰方法取二阶解 $A_{NL}(z, t) = \gamma A_1(z, t) + \gamma^2 A_2(z, t)$, 优化微扰方法取一阶解 $A_{NL}(z, t) = \gamma A_1(z, t)$ 时, 优化微扰方法在大功率高非线性长距离传输的光纤链路分析中也要优于原微扰方法.

失其半解析模型, 扩大了应用范围, 为各种非线性效应分析及补偿、非线性信道容量计算提供了更为精确的半解析模型, 同时为研究大功率长距离传输的光纤通信系统提供了新的方法.

4 结 论

在非线性效应增强的情况下提出了优化的时域微扰方法, 并在多跨距长距离非线性光纤传输系统中, 与原时域微扰法进行模拟仿真对比. 研究结果表明优化微扰方法既提高了计算结果的精确度又不

参 考 文 献

- Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Application of Nonlinear Fiber Optics (Third Edition)[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 22~78
- Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用(第三版)[M]. 贾东方, 余震虹译. 北京: 电子工业出版社, 2003. 22~78
- Li Jun, Huang Dexiu, Zhang Xinliang. Numerical analysis of fiber propagation model [J]. Optoelectronic Technology &

- Information*, 2003, **16**(2): 9~12
- 李 钧, 黄德修, 张新亮. 光纤传输模型的数值计算研究[J]. 光电子技术与信息, 2003, **16**(2): 9~12
- 3 Deng Chunnian, Wen Shuangchun. Breakup mechanisms for chirped pulse in the single-mode fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1035~1040
- 邓春年, 文双春. 单模光纤中啁啾脉冲的分裂机制[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 1035~1040
- 4 Ning Tigang, Li Tangjun, Liu Yan *et al.*. Study on Gaussian pulse transmission over ultra-high polarization mode dispersion fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 951~954
- 宁提纲, 李唐军, 刘 艳 等. 超高偏振模色散光纤中光脉冲传输行为的研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(8): 951~954
- 5 Shao Qunfeng, Qi Xiaoqiong, Zhang Xiaoping. Study on convergence of the Volterra series transfer function model of optical pulse's propagation in fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 323~326
- 邵群峰, 漆晓琼, 张晓萍. 光脉冲传输的 Volterra 级数模型收敛性质的研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(s2): 323~326
- 6 Ren Jianhua, Yu Chongxiu, Wang Kuiru. Analytic resolution of waveguide dispersion in single mode fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1301~1304
- 任建华, 余重秀, 王葵如. 单模光纤色散的解析形式[J]. 光学学报, 2001, **21**(11): 1301~1304
- 7 K. V. Peddannragari, Maite Brandt-Pearce. Volterra series transfer function of single-mode fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(12): 2232~2241
- 8 K. V. Peddannragari, Maite Brandt-Pearce. Volterra series approach for fiber optic communications system designs[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(11): 2046~2055
- 9 Jong-Hyung Lee. Analysis and characterization of fiber nonlinearities with deterministic and stochastic signal sources[D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000. 23~42
- 10 Qi Xiaoqiong, Shao Qunfeng, Zhang Xiaoping. Lumped fiber nonlinear noise compensation based on volterra theory [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1527~1532
- 漆晓琼, 邵群峰, 张晓萍. 基于沃尔泰拉理论的集总光纤非线性噪声补偿[J]. 中国激光, 2007, **34**(11): 1527~1532
- 11 Bo Xu. Study of fiber nonlinear effects on fiber optic communication systems [D]. University of Virginia, 2003. 10~18