

## 一种光纤通信系统中非线性克尔效应抑制新方法\*

李源<sup>1)</sup> 成浩然<sup>2)</sup> 李蔚<sup>2)†</sup> 余少华<sup>3)</sup> 杨铸<sup>3)</sup>

1) (华中师范大学, 计算机科学与技术学院, 武汉 430079)

2) (华中科技大学, 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

3) (武汉邮电科学研究院, 国家光纤通信技术与网络重点实验室, 武汉 430074)

(2012年2月2日收到; 2012年4月1日收到修改稿)

本文从非线性薛定鄂方程出发, 提出了一种全光学的相位预加重来抑制非线性克尔效应的新方法, 通过在发射端将输入光脉冲的初始相位上叠加一个平方相位值, 改变光脉冲的初始相位值, 从而提高光脉冲在光纤传输中抗非线性克尔效应能力. 通过理论研究, 仿真分析以及实验验证了该方法的可行性, 实验验证在接收端可以提高误码率2个数量级以上. 在长距离大容量光纤通信系统中有很好的应用前景.

**关键词:** 光纤通信, 非线性克尔效应, 非线性薛定鄂方程, 相位预加重

**PACS:** 42.30.Q, 43.80.S, 42.30.L

## 1 引言

光纤通信已成为现代通信网的基本组成部分, 大容量、高速, 单信道 100 Gbit/s 及以上传输技术已经成为热点. 而在高速长距离光纤通信系统中, 光纤的色散效应和非线性克尔效应是限制通信系统容量的两大主要因素. 色散导致脉冲展宽和波形畸变, 非线性效应导致脉冲频谱的变化以及信道间的串扰等, 它们都会使信号产生失真, 并导致系统传输误码率的增大. 因此在通信系统中需要对色散和非线性效应加以适当的控制和补偿<sup>[1]</sup>. 而在目前光纤通信系统中, 色散补偿技术, 如色散补偿光纤 (DCF)、电色散补偿模块等也已经相当成熟<sup>[2]</sup>; 但随着光纤中的光功率增大、信道数增多, 已使光纤非线性效应成为影响系统性能的主要因素.

近些年来, 关于抑制光纤非线性效应的研究也取得了一定的进展, 提出了很多新的方法和技术, 比如模拟或数字的非线性电均衡技术、预编码技术、数字后向传输 (BP) 法、光相位共轭 (OPC) 法和非线性管理技术<sup>[3]</sup> 等. 这些对非线性抑制方法基本是采用电子信号处理芯片技术, 在接收端通过

数字信号处理技术来纠正, 算法比较复杂, 同时会受到电子芯片处理速度的限制, 也需要很大的功耗.

本文从光脉冲在光纤中传输的非线性薛定鄂方程入手, 研究并提出了一种减小非线性损伤的新方法——相位预加重技术, 本文所提出的方法只需要在发射端加上一个全光相位预加重的光模块就可以实现非线性克尔效应的抑制, 具有简单实用、绿色低能耗的特点.

本文出发点在于, 非线性克尔效应对信号脉冲的频域会产生影响, 导致频率啁啾的出现. 在一定近似下, 我们认为这种频率啁啾是线性的. 那么就可以利用相位预加重过程产生的频率啁啾抵消光信号传输过程中非线性效应引起的频率啁啾, 从而抑制光纤非线性效应. 本文提出的方法和观点类似预啁啾技术, 但是, 该技术目前只用于色散的补偿<sup>[4]</sup>.

## 2 相位预加重实现非线性抑制的原理

光脉冲在单模光纤中传输的非线性薛定鄂方程 (NLSE), 对脉宽大于 5 ps 的脉冲, 可描述如下<sup>[5,6]</sup>:

\* 国家自然科学基金 (批准号: 6177063, 61003192)、国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2010CB328305) 和光纤通信与光网络国家重点实验室开放基金资助的课题.

† E-mail: weilie@mail.hust.edu.cn

$$\begin{aligned} & \frac{\partial A(z,t)}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A(z,t)}{\partial t} \\ & + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A(z,t) \\ & = i\gamma |A(z,t)|^2 A(z,t), \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $A(z,t)$  是光脉冲的慢变包络,  $\beta_1 = \frac{1}{v_g}$  是光脉冲的纵向传播常数 ( $v_g$  是群速度),  $\beta_2$  是二阶色散常数,  $\alpha$  是损耗系数,  $\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}}$  是非线性系数 ( $n_2$  是非线性折射率,  $\omega_0$  是光波频率,  $c$  是光速,  $A_{\text{eff}}$  是有效纤芯面积).

$z = L$  处的通解为

$$A_1(L, T) = A_1(0, T) \exp(i\varphi_1), \quad (2)$$

式中, 与时间有关的非线性相移由下式得到:

$$\begin{aligned} \varphi_1(T) = & \gamma_1 \left[ L |A_1(0, T)|^2 \right. \\ & \left. + 2 \sum_{k=2}^N \int_0^L |A_k(0, T - zd_{k1})|^2 dz \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

方程 (2) 和 (3) 的物理意义是: 当脉冲通过光纤时, 由于折射率与强度有关, 脉冲相位受到调制. 方程 (3) 的第一项起因于非线性克尔效应的自相位调制效应 SPM (self-phase modulation). 第二项起因于非线性克尔效应的交叉相位调制效应 XPM (cross phase modulation). 由于群速度失配, 其作用沿光纤长度方向是变化的 [6].

由 SPM 和 XPM 引起的频率啁啾为

$$\begin{aligned} \Delta\nu_1(T) \approx & \frac{\gamma_1 L}{\pi T_0} \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) \left[ P_1 \frac{T}{T_0} \right. \\ & \left. + \sum_{j=2}^N P_j \left( \frac{2T}{T_0} - \delta_{j1} \right) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

在高斯脉冲中心附近较大范围内,  $\exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) \rightarrow 1$ , 故 (4) 式可进一步写为

$$\Delta\nu_1(T) \approx \frac{\gamma_1 L}{\pi T_0} \left[ P_1 \frac{T}{T_0} + \sum_{j=2}^N P_j \left( \frac{2T}{T_0} - \delta_{j1} \right) \right]. \quad (5)$$

这时的啁啾是线性的, 与光纤非线性系数、脉冲宽度、传输距离、各脉冲的功率及走离效应有关.

那么, 我们可以考虑对信号脉冲人为预先引进一个相位, 使之与 (5) 式中的非线性带来的相位刚好相反, 从而使传输后的脉冲出现相位和啁啾消除的现象, 以达到抑制光纤非线性 Kerr 效应的作用. 这就是预加重实现非线性抑制的原理.

### 3 全光相位预加重的实现

对于实际的大容量光纤传输系统而言, 是采用密集波分复用技术, 很多个波长在光纤中同时传输, 尽管不同波长之间群速度不同而存在走离效应, 但是任何一个波长的某个脉冲与其他波长的脉冲序列之间总能保持较大的重叠, 非线性作用受到走离效应的影响不大, 可以忽略. 那么, 将 (5) 式简化成

$$\Delta\nu_1(T) \approx \mu T, \quad (6)$$

其中  $\mu = \frac{\gamma_1 L}{\pi T_0^2} \left( P_1 + 2 \sum_{j=2}^N P_j \right)$  是线性啁啾系数. 光学的线性调频可以通过光相位调制实现, 光相位  $\phi$  满足  $\frac{d\phi}{dt} = 2\pi\nu$  ( $\nu$  是频率), 那么结合 (6) 式可得相位调制函数为

$$\Delta\phi(T) = \pi\mu T^2. \quad (7)$$

对于 LiNbO<sub>3</sub> 波导的光学相位调制器而言, 其相位调制函数为

$$\Delta\phi(T) = \frac{V(T)}{V_\pi} \pi, \quad (8)$$

其中  $V(T)$  是加在相位调制器上的电驱动信号,  $V_\pi$  是调制器的半波电压. 根据 (7) 和 (8) 式有

$$V(T) = \mu V_\pi T^2 \quad (9)$$

这里  $T$  是以群速度  $v_g$  移动的时间坐标, 即原点与脉冲序列中的某个脉冲中心重合, 只对单脉冲跟踪. 对于整个脉冲序列而言, (9) 式就应该改写成以脉冲周期  $T_p$  为周期的函数

$$V(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \mu V_\pi (t - nT_p)^2, \quad -\frac{T_p}{2} \leq t < \frac{T_p}{2}. \quad (10)$$

该驱动信号为周期抛物线形电信号. 目前有直接用正弦波模拟周期抛物线波形的方案, 不过精度较低. 由于是非常规波形, 要实现高保真的周期抛物线波形, 需采用傅里叶级数展开多阶正弦波叠加近似或用任意波形发生器 (AWG) 生成, 不过目前的技术水平还不能做到很高的速率.

以啁啾调制的直接检测系统为例, 对于啁啾脉冲而言, 每个脉冲的半高全宽  $T_{\text{FWHM}} = \frac{2}{3}T_p$ , 同时有  $T_{\text{FWHM}} = 2(\ln 2)^{1/2}T_0$ , 可得

$$T_0 = \frac{T_p}{3(\ln 2)^{1/2}}, \quad (11)$$

结合 (6) 和 (10) 式可得驱动电压峰峰值

$$V_{\text{pp}} = \frac{9\gamma_1 L V_\pi \ln 2}{4\pi} \left( P_1 + 2 \sum_{j=2}^N P_j \right). \quad (12)$$

可见为补偿非线性 Kerr 效应带来的线性啁啾, 调相器所需的驱动电压峰峰值与传输速率无关, 而与各信道发射功率之和以及传输距离线性相关. 单信道传输速率决定的是抛物线驱动电压信号的重复频率.

本文就在发射端采用图 1 的方式来实现相位的预加重从而抑制非线性.

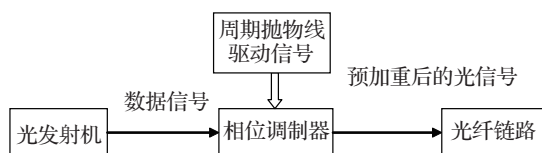


图 1 预加重光模块的示意图

### 4 仿真分析

本文采用系统仿真采用商用传输模拟软件 VPItransmissionMakerTM v8.3 (Virtual Photonics Inc), 以验证我们提出的预啁啾方法抑制光纤非线性效应在 DWDM 系统中的传输性能. 系统结构框图如图 2 所示, 图中缩写 LD 为激光器, DATA 为数据流, CLOCK 为时钟信号, MZM 为马赫 - 泽德调制器, PM 为相位调制器, AWG 为任意波形发生器, MUX 为波分复用器, BA 为功率放大器, SMF 为标准单模光纤, DCF 为色散补偿光纤, LA 为线路放大器, DMUX 为解复用器, Detector 为探测器.

仿真建立一个传输速率 40 Gbit/s/信道, 强度调制 - 直接检测的密集波分复用系统, 采用 1550.12 nm 附近, 200 GHz 信道间隔的 C-band 频率, 信道数 49. 任意波形发生器 (AWG) (12) 式所示的周期抛物线形电驱动信号, 同时加到 49 路相位调制器上实现预加重, 经复用后送入光纤链路传输. 传输光纤损耗  $\alpha = 0.2$  dB/km, SMF 的色散系数  $D = 16$  ps/(nm·km), 色散斜率  $S = 0.08$

ps/(nm<sup>2</sup>·km), 每段 SMF 长度为 40 km; DCF 完全补偿 SMF 的色散, 每段对应长度为 8 km. 光纤的 Kerr 非线性折射率  $n_2 = 2.6 \times 10^{-20}$  m<sup>2</sup>/W. 线路放大器 LA 采用噪声指数  $F = 5$  dB 的 EDFA 使之完全补偿本段光纤的损耗. 数据信号 DATA, AWG 和接收机三者时钟 CLOCK 同步. 设单信道发射功率为  $P$ , 总传输距离为  $L$ .

根据 (6) 和 (12) 式, 在传输速率给定的条件下, 相位调制器驱动电压峰峰值的大小决定了其加在信号脉冲上的最大相移量, 即最大的频移. 这决定了预加重方法能补偿的光纤非线性 Kerr 效应所致相位畸变的范围, 因为相位调制器所能承受的驱动电压是在一定范围内的. 在这个范围内, 相位调制器驱动电压峰峰值的大小随总发射功率和总传输距离  $L$  线性增长, 才能完全补偿光纤非线性 Kerr 效应所致的相位畸变.

对于密集波分复用传输系统, 不同信道因光载波频率的相对位置不同, 信号受到的非线性作用会有差异. 如图 3, 在发射功率和传输距离一定的条件下, 不同信道的最佳补偿点, 即是接收端误码率最小的预加重相移值不尽相同. 信道 1 与其他信道的相互作用最弱, 最佳补偿点在 PM 相移 1000° 左右; 信道 5, 6, 7 三者相邻, 受到非线性损伤程度接近, 且强于信道 1; 而信道 30 处于波长段的中部, 非线性效应对其信号传输的影响最大. 这与 (5) 式中的走离效应参量  $\delta_j$  有关, 频率差距越大, 走离效应越强, 就会减弱光功率对非线性效应的贡献. 如果不考虑走离效应, 见 (6) 式, 那么各信道受到的非线性损伤就会基本一致, 即各信道的最佳补偿点趋于重合. 对于单个信道而言, 如信道 6, 之所以存在最佳补偿点, 是因为只有该点相位刚好完全补偿, 相位调制器驱动电压不够 (欠补偿) 或是超过该点 (过补偿), 都会有残余啁啾存在, 影响整个系统的传输性能.

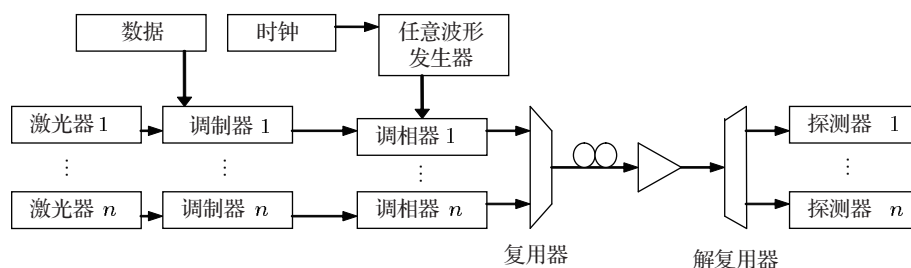


图 2 预啁啾仿真系统结构框图

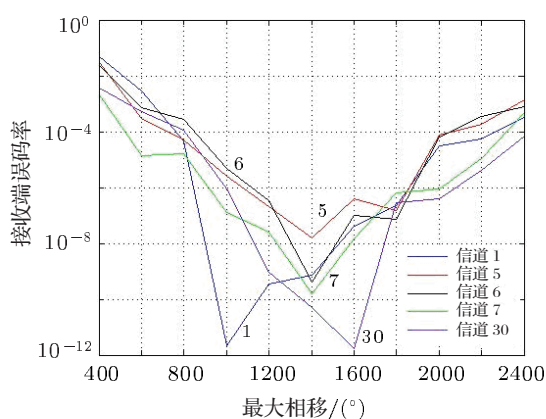


图3  $P = 1.0 \text{ mW}$ ,  $L = 960 \text{ km}$  时不同信道接收端误码率随相位调制器最大相移变化的曲线图

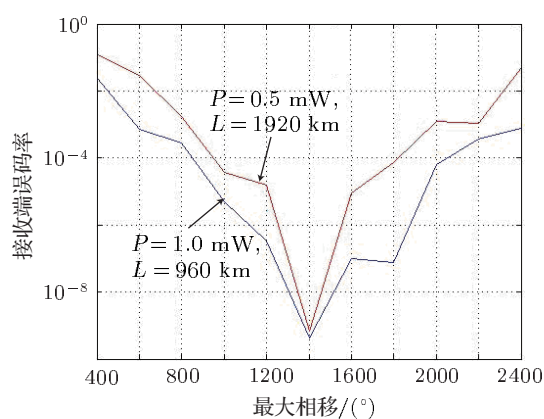


图4  $P = 1.0 \text{ mW}$ ,  $L = 960 \text{ km}$  和  $P = 0.5 \text{ mW}$ ,  $L = 1920 \text{ km}$  时信道 6 接收端误码率随相位调制器最大相移变化的曲线图

另一方面, 由于相位调制器所能承受的驱动电压有限, 所以使用单个相位调制器进行预加重时就存在一个补偿极限. 如图 4 所示, 发射功率一定时, 单独研究一个信道, 如信道 6 在不同传输距离时的非线性补偿效果, 也可以得出这样一个结论: 当光发射功率  $P$  与总传输距离  $L$  的乘积一定时, 对信道 6 而言, 最佳补偿点重合. 这一结论与 (12) 式的函数关系相互佐证.

### 5 实验验证

为了进一步验证本文的方法对光纤非线性克尔效应的抑制效果, 本文进行了实验, 由于实验条件限制, 采用 7 路光组组成密集波分复用系统, 光源采

用 C 波段标准的信号频率, 中心波长 1548.9 nm, 间隔 100 GHz, 每个光源发射功率均为 20 mW; 误码仪作为信号源输出伪随机码序列, 速率 2.5 Gbit/s; 信道 3 是通过预加重后带补偿的信号, 然后与其他信道复用进入光纤链路; 相位调制器由任意波形发生器 AWG 产生的周期抛物线型脉冲驱动如图 4 和图 5 所示; 驱动信号重复频率 2.5 GHz, 驱动信号最大电压 7.9 V. 光纤链路由 SMF, DCF 和光放大器组成, 色散完全补偿, SMF 长 40 km, DCF 长 10 km; 放大器采用 EDFA, 保证接收机接收到的信号处于最佳接收功率范围, 约 -2 dBm; 接收端通过可调光滤波器 (TOF) 滤出信道 3 中的信号, 送入光接收机中恢复出原始信号. 实验系统结构框图 5 所示. 图 6, 图 7 是实验测试得到的数据.

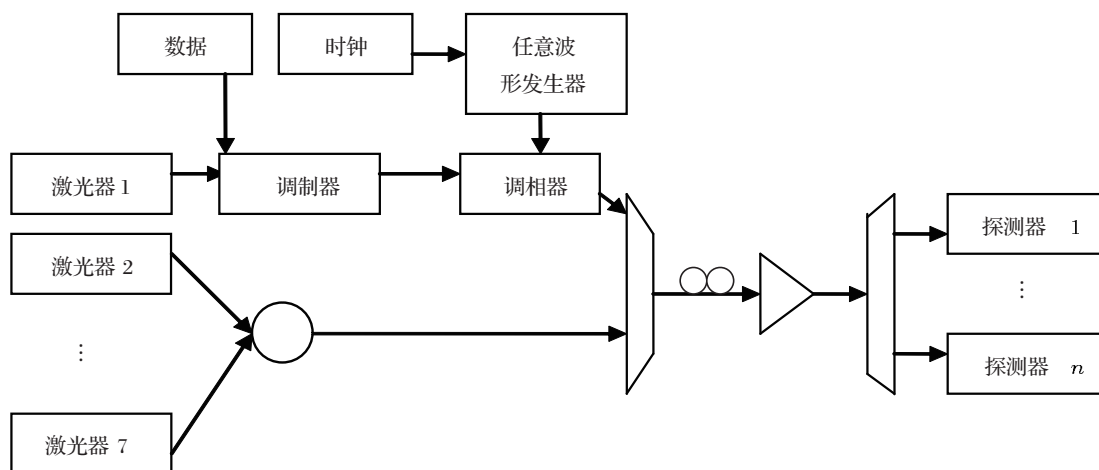


图5 预加重实验系统结构框图

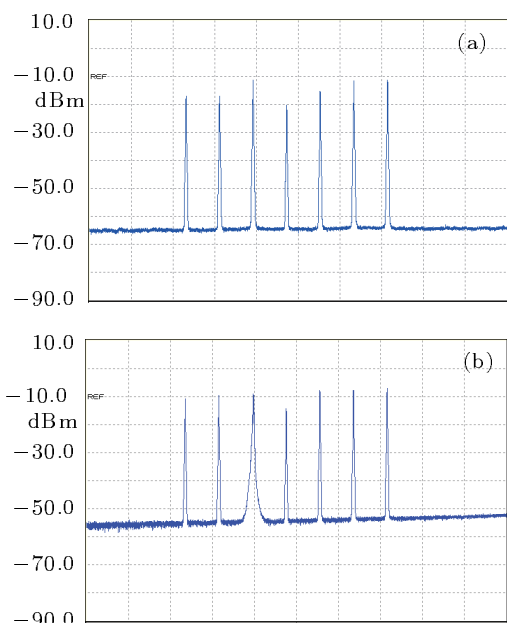


图6 7路复用入纤前的光谱 (a) 信道3未加预加重; (b) 信道3加入预加重

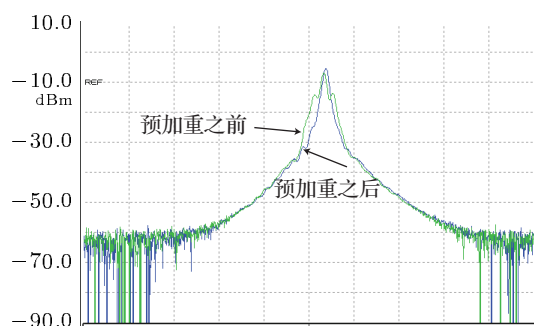


图7 信道3的光谱

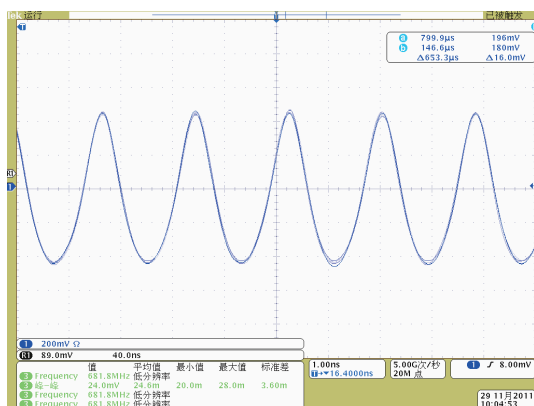


图8 加在相位调制器上的电驱动信号

预加重的作用是产生与光纤非线性克尔效应相反的相位畸变, 那么在光谱上表现为使频谱产生某种展宽. 图6中(b)相对于(a)产生的展宽来源于强度调制和预加重的双重效应, 其中预加重的作用

如图7所示.

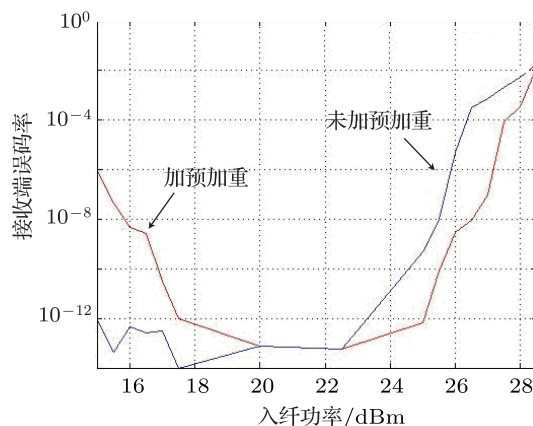


图9 加与不加预加重后信道3接收端误码率随入纤功率变化的曲线对比图

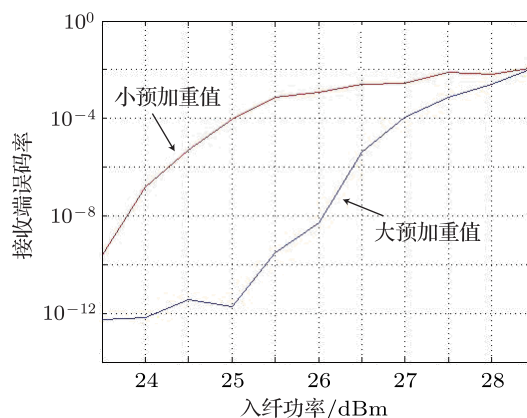


图10 预加重程度不同时信道3接收端误码率随入纤功率变化的曲线对比图

入纤功率的变化使光纤非线性效应强弱产生变化. 图9中信道3若不加预加重, 在入纤功率较低, 非线性效应较弱时, 接收端误码率很低且保持稳定; 随着入纤功率增大到非线性不可忽略时, 接收端误码率开始迅速上升, 系统性能劣化. 而信道3加入一定相位畸变后, 开始非线性较弱, 预加重起到了反作用, 反而劣化了系统性能; 随着入纤功率增大, 光纤非线性效应导致的相位畸变逐步与预加重相抵消, 接收端误码率减小, 直到完全抵消达到最佳; 再进一步增大光纤非线性效应, 就超出了预加重的补偿范围.

进一步研究不同预加重下接收端误码率随入纤功率变化的规律. 预加重相位大小的改变通过控制相位调制器的电驱动电压峰峰值实现, 加在相位调制上的周期抛物线形电驱动信号: 当预加重的相位值较大时, 其接收端误码率的最佳值显然会出现在使光纤非线性效应较强的入纤功率下, 如

图 10 所示; 而预加重较小时, 其最佳补偿点应该出现在 23.5 dBm 之前.

虽然采用的系统结构和分析方向不同, 图 9 和图 10 得出的结论与仿真结果基本吻合, 也能较好的支持预加重抑制非线性克尔效应的理论.

## 6 结论

本文提出并研究了一种新的非常简单的全光学相位预加重的方法来抑制光纤非线性克尔效应, 从系统仿真和实验两方面验证了该方法的可行性.

预加重方法结构简单, 只需要在发射端对输入的信号加上一定的相位畸变, 很易于实现, 整个系统的功耗就是相位调制器上的功耗, 能耗低, 对非线性效应的抑制效果较好, 可以提高系统误码率 2 个数量级, 很适合绿色光通信技术. 下一步的工作将不同频率之间的走离效应和色散考虑进来, 建立更为精确的数学模型, 在已知系统参数的情况下计算出新的调相器驱动电压函数形式, 加大对非线性效应导致相位畸变所带来的容忍量, 希望能应用在系统中能得到更好的传输性能.

- [1] Zhang J Z, Wang A B, Wang Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3793 (In Chinese) [张建忠, 王安帮, 王云才 2009 物理学报 **58** 3793]
- [2] Han Q S, Qiao Y J, Li W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014219 (in Chinese) [韩庆生, 乔耀军, 李蔚 2011 物理学报 **60** 014219]

- [3] Jacobs I, John K S 2002 *Appl. Opt.* **41** 1057
- [4] Liang B, Du, Arthur J Lowery 2010 *Opt. Expr.* **18** 16
- [5] Li W, Qiao Y J, Huang Q S, Zhang H 2009 *Chin. Opt. Lett.* **7**(8)
- [6] Henmi N, Saito T, Ishida T 2009 *J. Light. Technol.* **12** 1706

# A novel simple fiber nonlinearity suppression method in fiber-optic transmission systems using an all optical phase pre-emphasis\*

Li Yuan<sup>1)</sup> Cheng Hao-Ran<sup>2)</sup> Li Wei<sup>2)</sup>† Yu Shao-Hua<sup>3)</sup> Yang Zhu<sup>3)</sup>

1) (*Department of Computer Science, Central China Normal University, Wuhan 430079, China*)

2) (*Wuhan National Lab for Optoelectronics, College of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

3) (*Wuhan Research Institute of Posts & Telecommunications, Wuhan 430074, China*)

(Received 2 February 2012; revised manuscript received 31 March 2012)

## Abstract

In this paper we propose, simulate and experimentally verify a novel and simple optical phase pre-emphasis method, which is capable of mitigating fiber nonlinearity in dense wavelength division mult-DWDM optical transmission systems. In our simple method, each transmitted wavelength is modulated by a phase modulator driven by a periodic parabolic electric driving signal. Both of the simulations and experimental results verify that the proposed method can effectively mitigate the fiber Kerr nonlinearity.

**Keywords:** optical fiber transmission system, nonlinear kerr effect, nonlinear Schrödinger equation, phase shift

**PACS:** 42.30.Q, 43.80.S, 42.30.L

---

\* Project supported by the China National Science Foundation Project (Grant Nos. 6177063, 61003192) and the China National Basic Research Program of China (973 Program: 2010CB328305), the Open Foundation of State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks (Wuhan Research Institute of Posts & Telecommunication).

† E-mail: weilee@mail.hust.edu.cn