

# 40Gbps 多信道 RZ/NRZ 码传输色散时频特性分析

陈晓敏<sup>1</sup>, 郭爱煌<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学电子与信息工程学院信息与通信工程系, 上海 200092;

2. 宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 电子科技大学, 成都 610054)

**摘要:** 采用分步傅里叶法求解信号在多信道系统中满足的耦合非线性薛定谔方程组, 建立 40Gbps 多信道通信系统的传输模型, 以该模型仿真分析了 NRZ 码和 RZ 码的传输性能, 并引入时频分析方法分析信号的传输性能。仿真结果表明, RZ 码能量集中, 误码率低; 在 40Gbps 通信系统中 RZ 码对 PMD 有一定的抑制作用, 降低了系统 OSNR 灵敏度的要求, 有利于现在的 10Gbps 的光纤通信系统速率升级到 40Gbps。  
**关键词:** 码型; 色散; 多信道; 时频分析

## Dispersion Time-frequency Analysis of RZ/NRZ Modulation Formats in 40Gbps Multi-channel System

CHEN Xiaomin<sup>1</sup>, GUO Aihuang<sup>1,2</sup>

(1. Dept. of Information and Communication Engineering, School of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092;

2. Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks (UESTC), Ministry of Education,

Electronic University of Science Technology, Chengdu 610054)

**【Abstract】** In terms of split-step Fourier transform, the numerical solution of nonlinear coupled Schrodinger equation is gotten, a 40Gbps WDM propagation model is established. The propagation performances of RZ and NRZ are simulated, and the results are analyzed by time-frequency analysis. The simulation results show that RZ format has more concentrated energy distribution and a lower BER. And PMD is restrained in some degree when RZ format is used. With the same power, the peak value of RZ format is higher than NRZ format, so that the require of OSNR in system is less. It is favorable for the existing optical system of 10Gbps to update to the system of 40Gbps.

**【Key words】** Modulation formats; Dispersion; Multi-channel; Time-frequency analysis

实际光纤通信系统中, 很多元器件是偏振敏感的。尤其在波分复用系统中, 当传输速率提高到 40Gbps 时, 原来在低速系统中可以忽略的偏振模色散 (PMD) 效应以及一些非线性效应已经不容忽视<sup>[1,2]</sup>。40Gbps 多信道传输中偏振模色散的影响的研究在我国刚刚起步<sup>[3-5]</sup>, 对于利用新型码技术抑制色散的研究还很少<sup>[6-8]</sup>, 尤其是还未出现利用时频分析法对信号的特性进行分析比较。

现在 10Gbps 的光通信网已经商用化, 短期内更换为 40Gbps 系统成本太高, 充分利用现有的系统实现 40Gbps 的速率具有重要的实际意义。40Gbps 系统就要有更高的入射功率, 高的入纤功率会增加非线性效应的影响, 同时还对光接收机等设备提出了更高的 OSNR 灵敏度的要求。本文采用分步傅立叶变换法解得的多信道耦合非线性薛定谔方程, 仿真了 40Gbps 两信道系统中归零码和非归零码受 PMD 和非线性效应的影响, 用时频分析方法将一维时域信号扩展到二维平面, 克服了傅里叶在整个频域进行变换的缺点, 从而直观地表明了相同的发射功率条件下, RZ 码调制可以比 NRZ 调制的峰值功率高出一倍, 有效地降低了对设备的 OSNR 的要求, 使得 40Gbps 系统更具可行性。

### 1 40Gbps 多信道传输模型

考虑光纤的衰减、色散(二阶色散、三阶色散和 PMD)以及非线性效应, 同时忽略四波混频(FWM)及其它非线性效应的情况下, 光脉冲在多信道系统中满足的方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_{jx}}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A_{jx} + \beta_{1jx} \frac{\partial A_{jx}}{\partial t} + \frac{i\beta_{2jx}}{2} \frac{\partial^2 A_{jx}}{\partial t^2} - \frac{\beta_{3jx}}{6} \frac{\partial^3 A_{jx}}{\partial t^3} \\ = i\gamma_j \left[ |A_{jx}|^2 + 2 \sum_{n=1, n \neq j}^N |A_{nx}|^2 + \frac{2}{3} |A_{ny}|^2 \right] A_{jx} \\ \frac{\partial A_{jy}}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A_{jy} + \beta_{1jy} \frac{\partial A_{jy}}{\partial t} + \frac{i\beta_{2jy}}{2} \frac{\partial^2 A_{jy}}{\partial t^2} - \frac{\beta_{3jy}}{6} \frac{\partial^3 A_{jy}}{\partial t^3} \\ = i\gamma_j \left[ |A_{jy}|^2 + 2 \sum_{n=1, n \neq j}^N |A_{ny}|^2 + \frac{2}{3} |A_{nx}|^2 \right] A_{jy} \end{aligned}$$

式中,  $\beta_{nx}, \beta_{ny}$  ( $n=1, 2, 3$ ) 为光纤快轴和慢轴的  $n$  阶群速度色散系数;  $\alpha$  为光纤的衰减系数 (dB/km);  $\gamma$  为非线性系数 ( $1/(w^2 km)$ ),  $\gamma = n_2 \omega / c A_{eff}$ ,  $A_{eff}$  为有效纤芯面积。

方程等号左边从第 2 项开始, 依次为衰减项、偏振项、二阶群速度色散项、三阶群速度色散项。等号右边为非线性项, 包括了自相位调制和交叉相位调制项, 交叉相位调制项体现了两偏振模之间的耦合作用。N=2 时即为两信道传输方程, 采用分步傅里叶法进行求解, 即得到仿真模型。仿真参数如下:

**基金项目:** 宽带光纤传输与通信网络教育部重点实验室(电子科技大学)开放课题基金资助项目

**作者简介:** 陈晓敏(1984-), 女, 硕士生, 主研方向: 光纤通信; 郭爱煌, 博士、副教授

**收稿日期:** 2005-12-22      **E-mail:** cxm-1984@163.com

$$A_{eff} = 80 \mu m^2, D = 0.6 ps / (km \cdot nm),$$

$$D_p = 0.5 ps / (km^{-1/2}), n_2 = 3.2 \times 10^{-15} cm^2 / w,$$

$$\beta_{2j} = -D \lambda_j^2 / 2\pi c, \gamma_j = n_2 \omega_j / c A_{eff}, (j=1,2).$$

信道间隔为  $\Delta\lambda = 0.1 nm$ ，信道一波长为  $\lambda_1 = 1551 nm$ ， $\lambda_2 = 1552 nm$ ，光纤段长度为  $z_n = 250 m$ ，计算步长  $h = 50 m$ ，光脉冲只沿一个方向入射，速率为 40 Gbps。

## 2 40Gbps 两信道系统 RZ&NRZ 性能比较

为更清楚地对比 RZ 码和 NRZ 码的传输性能，仿真时用高斯单脉冲入射，每个脉冲取样点数 64 点。图 1 为两种调制格式传输 800km 脉冲变化的仿真结果，图 1(a)为 NRZ 码调制脉冲，图 1(b)为 RZ 码调制脉冲。

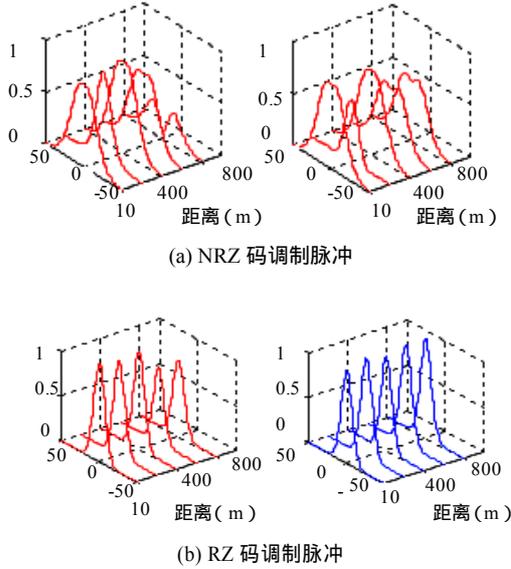


图 1 两种调制格式传输过程脉冲变化

从图 1 可以看到随着传输距离的增加，NRZ 码调制的脉冲逐渐展宽，两偏振分量之间的时延差逐渐积累而引起走离，非线性等因素使得脉冲发生了形变。脉冲展宽必然引起信道内误码率的增加，导致系统传输性能恶化。而采用 RZ 码调制格式的脉冲传输过程中波形发生了微小的展宽，两偏振分量也没有出现明显的走离现象，这说明采用 RZ 码调制对于偏振模色散有抑制作用，更适合高速通信系统。为更直观地分析两种调制格式的传输特性，下面采用时频分析法分析传输过程中的脉冲变化，图 2 为对应于图 1 不同传输距离的光脉冲的正频率。

从图 2 (a)初始脉冲时频图可以直观地看到光脉冲包含有许多不同频率的分量，NRZ 码的能量分布较为分散，RZ 码的能量分布集中，这为 RZ 码长距离传输提供了优势。由于光脉冲传输时，不同频率分量的传输速度不一样，因此引起色散导致光脉冲展宽。从图 2 (b)、图 2 (c)、图 2 (d)、图 2 (e) 可以看出，随着传输距离的增加，两种调制格式的光脉冲在时间轴上都出现展宽，NRZ 码的能量分散相当严重，图 2 (e) 传输 800m 时，NRZ 码已经出现了非常严重的变形，而采用 RZ 码调制的脉冲未出现明显展宽，这有利于系统的判决接收，降低了传输误码率。当输入功率相同时，RZ 码的幅值要比 NRZ 码高出一倍，降低了对系统的 OSNR 要求，从而提高了系统的接收灵敏度。从时频分析可以看出传输过程中 RZ 码能量基本保持集中，从而可以传输更长的距离，更适合高速传输。

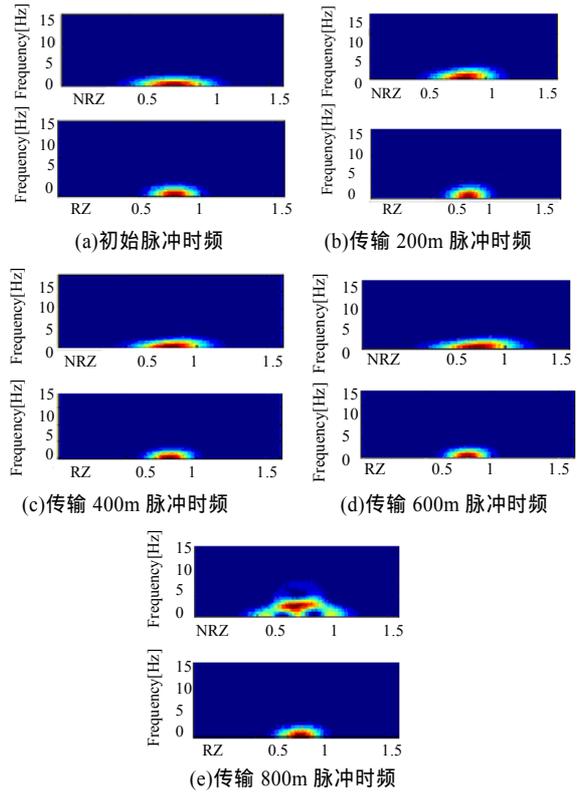


图 2 两种调制格式光脉冲传输特性的时频分析

当系统速率提高到 40 Gbps 时，偏振模色散不可忽视，图 3 给出了 NRZ 码传输 800m 在时频窗中的波形图。

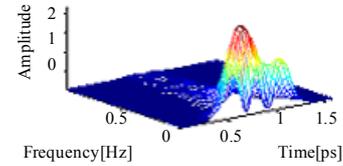


图 3 NRZ 码传输 800m 在时频窗中波形

从时频窗可以直观地看到 NRZ 码出现了两个偏振分量，脉冲展宽严重，能量在整个正频域分散。在强输入光场作用下，光纤中会出现较强的非线性克尔效应<sup>[9]</sup>，光纤的折射率与光强成正比，脉冲的后沿比前沿传输快，引起脉冲压缩。当这种压缩效应与色散单独作用引起的展宽效应平衡时，光脉冲可以保持波形稳定不变地在光纤中远距离传输。这是 RZ 码能保持波形长距离传输的原因。

## 3 结论

通过数值仿真对比了 NRZ 码和 RZ 码在 40 Gbps 多信道系统中的传输特性。仿真结果表明在高速长距离通信中，RZ 码调制光脉冲展宽速度慢，对偏振模色散有抑制作用，波形保持好，从而传输性能更为优越，且能量集中，相同入射功率时比 NRZ 码的峰值功率高，从而有效地提高了接收灵敏度，更有利于利用现有的系统实现 40 Gbps 通信，对于光纤通信系统的平滑升级有着重要的实际意义。通过时频分析法将一维信号扩展到二维平面，从而更直观有效地对比了信号在任意位置的能量分布变化，更方便地得到信号的传输特性。时频分析结果证明了 40 Gbps 系统中 RZ 码的性能更为优越。随着 40 Gbps 多信道系统逐步走向商用化，RZ 码调制格式以及在此基础上发展起来的各种调制格式必将呈现出巨大的应用前景。

(下转第 118 页)