

偏振模色散对多信道光纤通信系统信号的影响*

陈林 张晓光 张茹 于丽 杨伯君

(北京邮电大学#49 信箱,北京 100876)

摘要 利用耦合非线性薛定谔方程,计算了考虑 PMD 和非线性效应情况下 8×40 Gb/s 波分复用光纤通信系统中的波形及频谱. 与不考虑 PMD 结果的比较表明:由于 PMD 的影响使得波形变宽,频谱分裂,同时通过比较还发现 PMD 对各信道的影响是不同的,这将有利于开发 WDM 系统中 PMD 补偿系统.

关键词 波分复用(WDM);偏振模色散(PMD);交叉相位调制(XPM)

中图分类号 O436.3;TN929.11

文献标识码 A

0 引言

20 世纪 80 年代以来人们对光纤中的 PMD 进行了大量的研究,主要包括研究 PMD 对信号的影响以及 PMD 补偿方案,但这些研究大多是对单信道的光纤通信系统而言的,而对波分复用系统中 PMD 的影响却研究很少. 对 WDM 系统中 PMD 的研究已成为目前高速光纤通信中 PMD 理论及实验研究的前沿课题之一.

在波分复用(WDM)光纤通信系统中,在同一光纤中同时传送多个信道,光功率明显增加,非线性作用不可忽略. 由于不同信道之间的交叉相位调制现象(XPM),导致 PMD 对光脉冲传送的影响比单信道更加严重^[1],因此研究 WDM 系统中的 PMD 问题必须同时考虑不同信道之间的交叉相位调制.

已有实验对 WDM 中 PMD 问题进行了研究,并提出了最坏信道 PMD 补偿法^[2],但在理论上,仅有少量文章对 2 信道 WDM 系统中的 PMD 问题进行了研究^[3]. 然而为揭示 WDM 系统中各信道 PMD 的差别,必须考虑更多的信道. 本文采用分步傅里叶变换法解多信道耦合非线性薛定谔方程,考虑了 PMD 和交叉相位调制的影响后,得到了 8×40 Gb/s WDM 系统中各信道传输 120 km 以后的波形及频谱,对比了考虑 PMD 和不考虑 PMD 频谱和波形的变化,并对所得的结果进行了分析,为 WDM 系统中最坏信道 PMD 补偿法提供了理论依据.

1 理论模型

在准单色近似下,光纤中同时存在的 8 束椭圆

偏振光波的电场可表示为

$$E(r, t) = \frac{1}{2} \hat{x} \left[\sum_j E_{jx} \exp(-i\omega_j t) \right] + \frac{1}{2} \hat{y} \left[\sum_j E_{jy} \exp(-i\omega_j t) \right] + c. c \quad (j=1, 2, \dots, 8)$$

式中 \hat{x} 是沿 x 方向偏振的单位矢量, \hat{y} 是沿 y 方向偏振的单位矢量, E_{jx}, E_{jy} 是中心频率为 ω_j 的光波在 x 和 y 方向的偏振分量,假设 E_{jx}, E_{jy} 为对时间的慢变包络振幅.

根据非线性薛定谔方程的类似方程^[4],考虑偏振的情况下,8 束光波在光纤中传输所满足的耦合方程为

$$\frac{\partial A_{jx}}{\partial z} + \frac{1}{v_{gix}} \frac{\partial A_{jx}}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_{jx}}{\partial t^2} - i\gamma_j (A_{jx}^2 + 2 \sum_{k \neq j}^8 |A_{kx}|^2 + \frac{2}{3} \sum_{m=1}^8 |A_{my}|^2) A_{jx} + \frac{\alpha}{2} A_{jx} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_{jy}}{\partial z} + \frac{1}{v_{giy}} \frac{\partial A_{jy}}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_{jy}}{\partial t^2} - i\gamma_j (A_{jy}^2 + 2 \sum_{k \neq j}^8 |A_{ky}|^2 + \frac{2}{3} \sum_{m=1}^8 |A_{mx}|^2) A_{jy} + \frac{\alpha}{2} A_{jy} = 0 \quad (2)$$

式中 $j = 1 \sim 8$, 为信道序号, i 为虚数单位,非线性系

数 $\gamma_j = \frac{n_2 \omega_j}{c A_{\text{eff}}}$ ($j = 1 \sim 8$).

在方程(1)、(2)中,括号内的第一项为自相位调制(SPM),后二项为交叉相位调制(XPM). 由于本文主要目的是考虑多道交叉相位调制在 PMD 存在时对脉冲的影响,为简单,先假定信号在两正交轴的偏振态具有相同的群速度,对式(1)、(2)进行归一化,各参量分别为

$$j_{jk} = \frac{A_{jk}}{\sqrt{P_0}} \quad (k = x, y), \quad \tau = \frac{t - z/v_g}{T_0}, \quad \xi = \frac{z}{L_{1D}}$$

$$L_{1D} = \frac{T_0^2}{|\beta_{2j}|}, \quad L_{jNL} = \frac{1}{\gamma_j P_0}, \quad \beta_{2j} = -\frac{\lambda_j^2}{2\pi c} D$$

式(1)、(2)变为

$$\frac{\partial u_{jx}}{\partial \xi} + \frac{i}{2} \frac{\partial^2 u_{jx}}{\partial \tau^2} - i \frac{L_{1D}}{L_{jNL}} (|u_{jx}|^2 + 2 \sum_{k \neq j}^8 |u_{kx}|^2 +$$

*863 计划(2001AA122041)、国家自然科学基金(60377026)、教育部博士基金资助项目
Tel:010-62281513 Email:lililiu@sina.com
收稿日期:2003-05-13

$$\frac{2}{3} \sum_{k=1}^8 |u_{kx}|^2 u_{jx} + \Gamma u_{jx} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_{jy}}{\partial \xi} + \frac{i}{2} \frac{\partial^2 u_{jy}}{\partial \tau^2} - i \frac{L_{1D}}{L_{jNL}} (|u_{jy}|^2 + 2 \sum_{k \neq j}^8 |u_{kx}|^2 + \frac{2}{3} \sum_{k=1}^8 |u_{kx}|^2) u_{jy} + \Gamma u_{jy} = 0 \quad (4)$$

式中 $j=1 \sim 8, \Gamma = \frac{\alpha}{2} L_{1D}$

2 数值模拟

通过数值方法解方程(3)、(4)是不容易的。本文通过分步傅里叶变换法进行研究,并分析考虑 PMD 时 8 信道波形和频谱的变化。常规情况下单模光纤在制作、成缆及外部环境作用下,不能认为两个方向的偏振具有相同的群速度,此时可将长距离的光纤看作是由许多段常数的弱双折射光纤联结在一起组成的,并且每小段具有相同的长度和折射率差 Δn ,两个正交的偏振方向之间产生随机轴的旋转和附加时延。设旋转轴的角度为 θ ,均匀分布在 $[0, 2\pi]$ 之间,从两段光纤结合处的一侧传到另一侧可引入以下传输函数表示 PMD 的影响^[5]

$$P(\omega) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\frac{\Delta\tau}{2}\Delta\omega} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\Delta\tau}{2}\Delta\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\Delta\tau$ 为当前计算光纤段两双折射轴的随机时延差,且呈现高斯分布。

$\Delta\omega = \omega_0 - \omega$, 而 ω_0 是光载波的中心频率。

综合以上考虑,可以得到考虑 PMD 和交叉相位调制现象(XPM)的分步傅里叶计算式为

$$U(z+h,t) = P(\omega) \exp\left(-\frac{h}{2}\hat{D}\right) \exp\left[\int_z^{z+h} \hat{N}(z') dz'\right] \cdot \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) U(z,t) \quad (6)$$

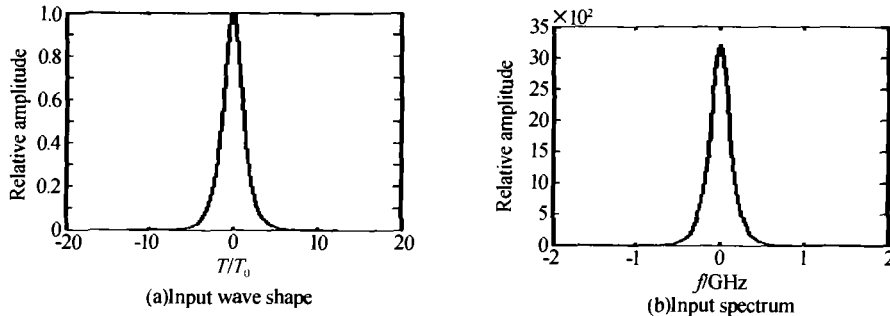


图 1 输入波形及频谱
Fig. 1 Input wave and its spectrum

$$\text{式中 } \hat{D} = \begin{bmatrix} -\frac{i}{2}\beta_{2j} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\alpha}{2} \\ -\frac{i}{2}\beta_{2j} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\alpha}{2} \end{bmatrix} \quad (j=1 \sim 8)$$

$$\hat{N} = \begin{bmatrix} i \frac{L_{1D}}{L_{jNL}} (|u_{jx}|^2 + 2 \sum_{k \neq j}^8 |u_{kx}|^2 + \frac{2}{3} \sum_{k=1}^8 |u_{ky}|^2) \\ i \frac{L_{1D}}{L_{jNL}} (|u_{jy}|^2 + 2 \sum_{k \neq j}^8 |u_{ky}|^2 + \frac{2}{3} \sum_{k=1}^8 |u_{kx}|^2) \end{bmatrix} \quad (j=1 \sim 8)$$

$\hat{D}, P(\omega)$ 在频域内操作, \hat{N} 在时域内操作。

利用以上模型,对 8×40 Gb/s 的 WDM 系统进行了数值模拟。用到的参量如下:入射脉冲都沿 x 轴方向偏振,即 $u_x = \text{sech}(\tau)$,并设各信道波长为: $\lambda_1 = 1543.6$ nm, $\lambda_2 = 1545.2$ nm, $\lambda_3 = 1546.8$ nm, $\lambda_4 = 1548.4$ nm, $\lambda_5 = 1550$ nm, $\lambda_6 = 1551.6$ nm, $\lambda_7 = 1553.2$ nm, $\lambda_8 = 1554.8$ nm。

光纤参量为: $A_{\text{eff}} = 80 \mu\text{m}^2, n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2/\text{w}, D = 0.6 \text{ ps/nm/km}, \text{PMD} = 0.5 \text{ ps/km}^{1/2}$, 为观察 PMD 的独立影响,不考虑损耗。初始入射功率 $p_0 = 0.5 \text{ mW}$ 。

3 结果及分析

由于正交偏振态的随机耦合,偏振模色散(PMD)呈现随机性,因此对脉冲的频谱进行了多次计算取平均。为了考察 PMD 的影响,在不计光纤损耗情况下,计算了考虑 PMD 和不考虑 PMD 情况下 8 个信道的频谱和波形的变化。图 1 是输入波形及频谱。不考虑 PMD,仅考虑交叉相位调制情况下,计算得到传输 120 km 后 8 信道的波形与频谱差别是不明显的,为简单起见,图 2 只给出其中一个信道的波形及频谱。不考虑 PMD 情况下,波形的变化和频谱的分裂,主要是由于非线性效应引起的交叉相位调制的结果。

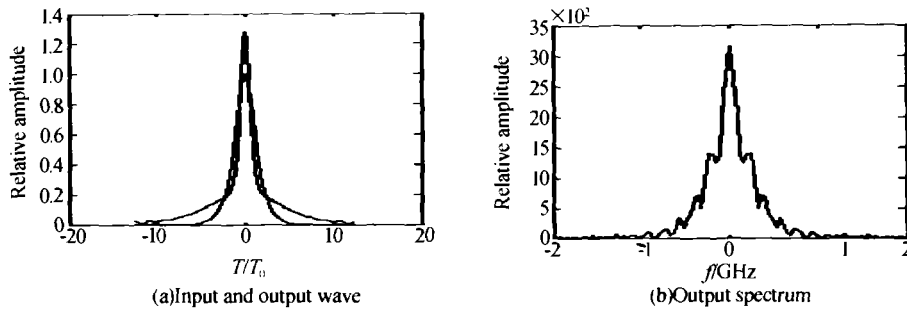


图2 不考虑 PMD 传输 120 km 的波形及频谱

Fig. 2 Output wave and its spectrum after 120 km without PMD

图 3 是同时考虑 PMD 和非线性效应后信号的波形与入射波形的对比图,考虑 PMD 后,传输过程中信号的变化是由于 PMD、交叉相位调制共同作用的结果. 很明显看出,由于 PMD 的作用波形明显变

宽,而且发生了不同程度的变形,这是由于出现了随机双折射. 综上所述,在 WDM 光纤通信系统中,由于 PMD 和信道间的交叉相位调制作用, PMD 对信号的影响是不可忽视的.

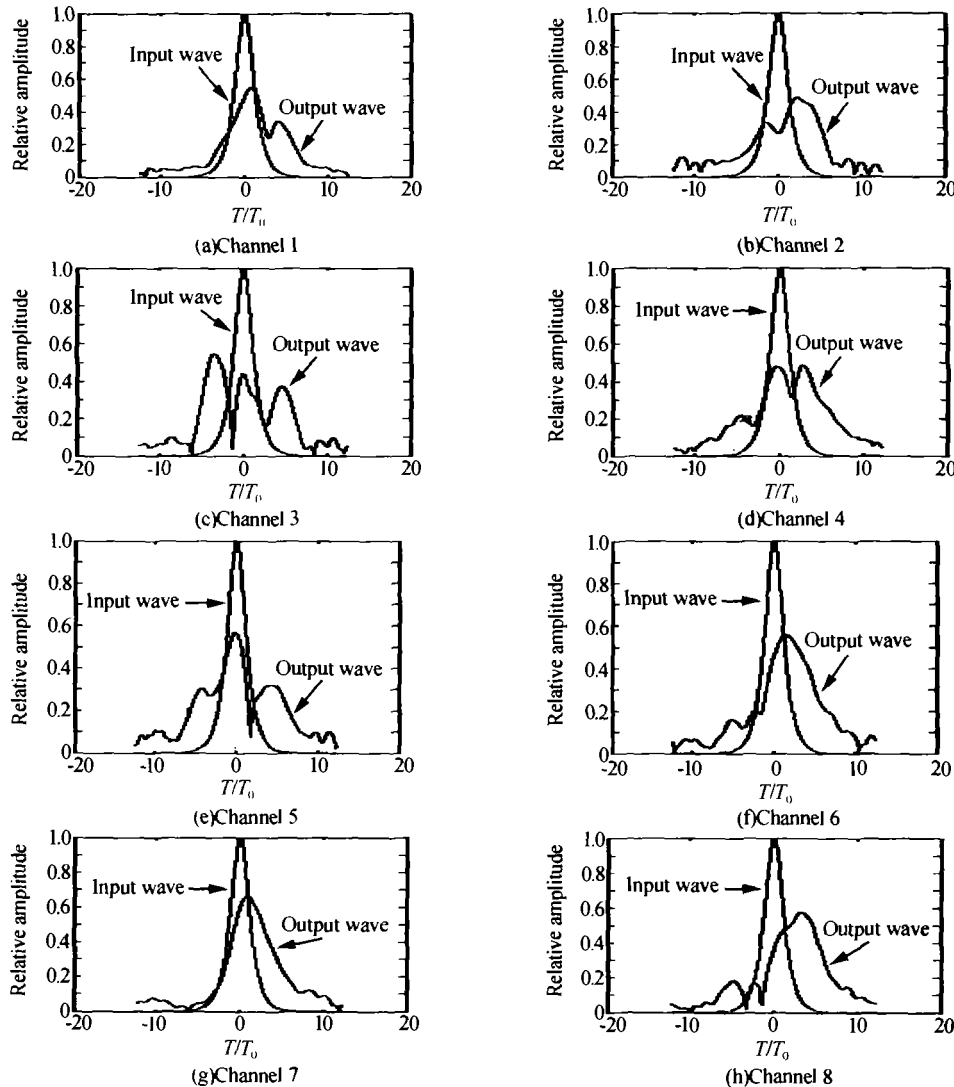


图 3 考虑 PMD 传输 120 km 后的八信道波形

Fig. 3 The output waves of eight light pulses after 120 km with PMD in comparison with the input wave

另外从图 4 所示的频谱来看, PMD 和交叉相位调制使得频谱分裂更加严重,同时出现了色散波即在脉冲两侧产生了大量的小脉冲,这样的结果是分散了能量,并且增加了相邻脉冲间的相互作用. 同

时从波形和频谱图还发现,在 WDM 系统中, PMD 的分布与波长有关,有些信号 PMD 影响小一些,有些影响大一些,这与实验的结果是相符的^[6]. 其实一阶偏振模色散只在一定的带宽内与波长无关^[7],而

波分复用的带宽要大于—阶偏振模色散的带宽,高阶偏振模色散效应的影响不可忽略^[8],应服从麦克斯韦分布^[6],即在一定的时间内处于较大 PMD 的信

道只占一部分,因此可以选取 PMD 较大的几个信道,将其分离出来进行补偿,这就是最坏信道补偿法^[2].

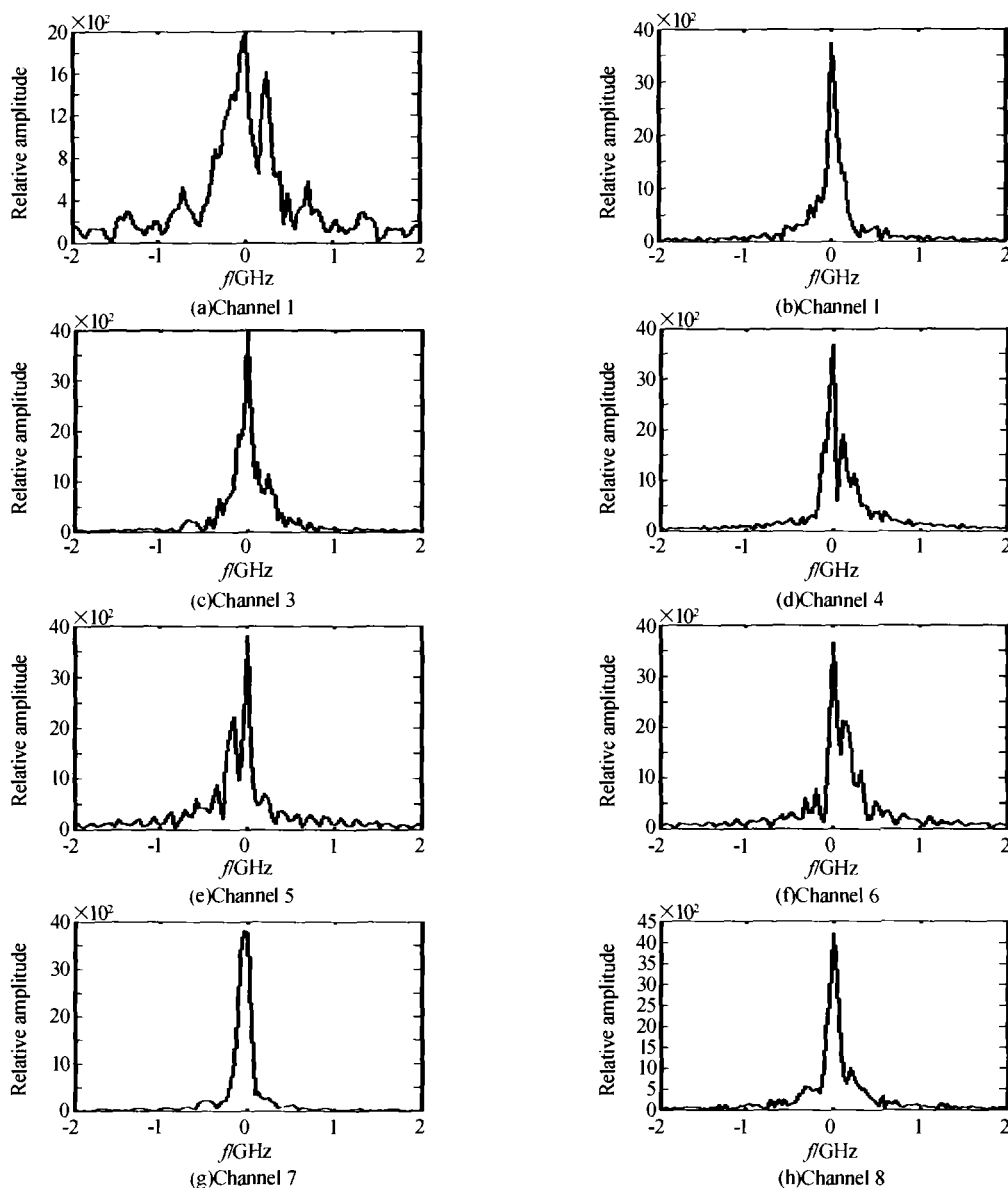


图4 考虑 PMD 后传输 120 km 八信道的频谱

Fig. 4 The output spectrums after 120 km with PMD

4 结论

通过解多道耦合非线性薛定谔方程,得到了只考虑非线性效应不考虑 PMD,以及同时考虑 PMD 和非线性效应情况下 8×40 Gb/s WDM 系统中的波形及频谱,结果表明:由于 PMD 的影响使得波形变宽,频谱分裂.同时还发现由于 PMD 的影响,各信道波形变化和频谱分裂的程度是不同的,在一定的时间内只有一部分信道 PMD 影响最严重,因此可以将这些信道解复用后,进行单独补偿,而对于 PMD 影响不严重的信道可以不必进行补偿,这样可以节约系统的代价.

参考文献

- 1 Khosravani R, Xie Y, Yan S, *et al.* Limitation to first-order PMD compensation in WDM system due to XPM-induced PSP changes. *OFC 2001 WAA5*
- 2 Möller L, Jeffrey H. Time-sharing of compensators as a PMD mitigation approach for multichannel transmission systems. *IEEE Photo Technol Lett*, 2002, **14**(5): 861 ~ 863
- 3 Liu X, Yang B, Zhang X. Polarization mode dispersion in WDM systems. *Opt Quantum Electron*, 2002, (34): 677 ~ 685
- 4 Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*. Academic Press. New York, 1989. 485 ~ 487
- 5 Eleftherianos C A, Syvridis D, Spicopoulos T, *et al.* Influence of polarization mode dispersion on the transmission

- of parallel and orthogonally polarized soliton at 40 Gb/s. *Opt Commun*, 1998, **154**(1):14 ~ 18
- 6 Khosravani R, Havstad S A, Song Y W, *et al.* Polarization-mode dispersion compensation in WDM systems. *IEEE Photo Technol Lett*, 2001, **13**(12):1370 ~ 1372
- 7 Karlsson M, Brentel J. Autocorrelation function of the polarization-mode dispersion vector. *Opt Lett*, 1999, **24**(14): 939 ~ 941
- 8 Mao Bincheng, Zhao Ronghua. The effect of PSP bandwidth on PMD compensaton in WDM system. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunication*, 2001, **24**(1):76 ~ 79

The Influences of Polarization Mode Dispersion on Multi-channel Optical Communication System

Chen Lin, Zhang Xiaoguang, Zhang Ru, Yu Li, Yang Bojun

Beijing University of post and Telecommunication box#49 ZIP:100876

Received date:2003-05-13

Abstract Based on the coupled nonlinear Schrödinger for eight different optical pulses in single mode fiber with PMD, the wave shapes and frequency spectra of eight channels are given. The influences of PMD on eight channels are analyzed in comparison with that of no PMD to show the signal pulses broadening and the frequency spectra splitting. The most important conclusion is that the influences of PMD on eight channels are different, which would be considered in development of a new PMD compensation method in WDM optical fiber communication system.

Keyword WDM; PMD; XPM



Chen Lin was born in 1968, senior engineer, has been working on the semiconductor device, and now is a Ph. D. student in Beijing University of Post and Telecommunication, majored in optical communication and photoelectron device. Now he is working on the subject "polarization mode dispersion and its adaptive compensation" with Professor Yang Bojun, Zhang Xiaoguang.