

# 混沌光通信与 OC-48 光纤通信的波分复用\*

张建忠 王安帮 王云才†

(太原理工大学理学院物理系,太原 030024)

(2008 年 5 月 8 日收到,2008 年 5 月 25 日收到修改稿)

数值证实并分析了混沌激光通信与现行光通信的波分复用传输,对于 100 GHz 的信道间隔,混沌激光通信系统实现了传输速率为 1 Gbit/s 数字信号的保密传输,现行光通信系统实现了传输速率为 2.5 Gbit/s 数字信号的传输.研究表明,当现行光通信中脉冲光信号的峰值功率不超过 17 dBm 时,混沌激光通信可在传输距离 80 km 内实现并行传输.此外,当现行光通信中脉冲光信号的峰值功率为 7 dBm 时,系统接收到的信号质量受混沌激光通信的干扰很小,当光纤传输距离从 80 km 增加到 160 km 时,对应的眼图开启度从 82% 降到 70%.

关键词:混沌光通信,混沌同步,波分复用,信道串扰

PACC: 0545, 4230Q, 4281D

## 1. 引 言

光纤传输已成为现代通信网络信息传输的重要手段之一.随着光纤通信技术的发展,光纤通信的保密性能也备受关注.混沌激光通信的提出<sup>[1]</sup>为信息的保密传输提供了一种新途径.目前,实现的混沌激光通信主要是利用专门建立、单独运行的实验系统对自由空间或短距离光纤传输的验证<sup>[2-4]</sup>.然而,更有意义的是在现有光纤网络中实现混沌激光的保密通信,尽管 2005 年,Argyris 等<sup>[5]</sup>在雅典借用 120 km 的商用光通信网络实现了传输速率 1 Gbit/s,误码率  $10^{-7}$  的混沌保密通信,但是,没有实现混沌激光通信与现行光通信波分复用的并行传输.

在现已铺设的光纤链路中实现混沌激光通信与现行光通信波分复用的兼容系统,结构简单且经济实用,具有非常大的应用潜力.由于半导体激光器是目前光通信系统的主要光源,理论和实验研究已表明半导体激光器易于产生宽带、高维的混沌激光<sup>[6-8]</sup>,因而以半导体激光器作为发射机产生的混沌载波信号可方便接入现有的光纤通信系统,无需额外铺设适合于混沌保密通信的光纤通道.混沌载波的带宽远小于光纤信道中的信道间隔,利用波分复用(WDM)技术可以实现混沌激光通信与现有光

通信的并行传输,然而关于这方面的研究工作至今还未见报道.在波分复用光纤通信系统中,多个波长的光波在同一光纤中传输,各个波的场强相互叠加,从而使光克尔效应的影响变得不容忽视.由于其他光波的存在,除了自相位调制(SPM),还会导致交叉相位调制效应(XPM),即一个光波的功率波动会调制同一光纤中传播的其他光波的相位,从而引入附加噪声,影响系统性能.本文数值证实了混沌激光通信与现有光通信在光纤信道中的并行传输,并进一步研究了混沌激光通信与现行光通信之间的相互串扰.

## 2. 理论模型

图 1 为混沌光通信与现行光通信波分复用传输的装置示意图.混沌光通信系统中的发射机和接收机分别由两个结构参数一致的光反馈半导体激光器  $LD_T$ ,  $LD_R$  组成.发射激光器  $LD_T$  输出的混沌载波经光隔离器 ISO 后实现单向传输,信息通过加法器直接隐藏在发射机输出的混沌载波中,与激光器 LD 发射出来的数字脉冲光信号经波分复用器 MUX 一起注入到光纤进行远程传输,在光纤的末端放置一个光放大器 EDFA 来补偿光纤的损耗,补偿后的混沌激光和数字脉冲光信号使用解复用器 DMUX 将这两束光进行分离,从而提取出现行光通信中加载

\* 国家自然科学基金(批准号:60577019)和山西省国际合作基金(批准号:2007081019)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

的数字信号. 分离后的混沌激光再经分束器 BS 分成两束: 一束注入到接收激光器中, 另一束输入到减

法器中与接收机输出的混沌波相减, 得到混沌光通信中加载的信息.

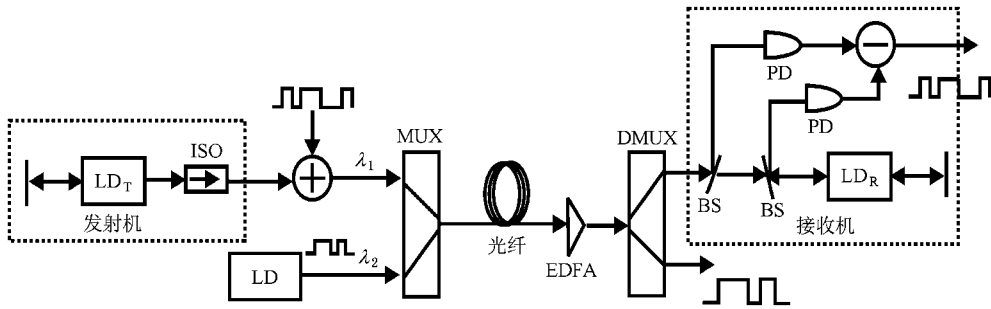


图 1 混沌光通信与现行光通信波分复用装置示意图

发射机和接收机的动力学过程可用考虑光反馈与光注入的半导体激光器 Lang-Kobayashi 单模速率方程来描述<sup>[9]</sup>,

$$\frac{dE_{T,R}(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha) \left[ G_{T,R}(t) - \frac{1}{\tau_p} \right] E_{T,R}(t) + k_{T,R} E_{T,R}(t - \tau) \exp(-i\omega\tau) + k_{inj} E_{ext}(t), \quad (1)$$

$$\frac{dN_{T,R}(t)}{dt} = \frac{I_{T,R}}{qV} - \frac{1}{\tau_n} N_{T,R}(t) - G_{T,R}(t) |E_{T,R}(t)|^2, \quad (2)$$

$$G_{T,R}(t) = \frac{G [N_{T,R}(t) - N_0]}{1 + \epsilon |E_{T,R}(t)|^2}, \quad (3)$$

式中, 脚标“T”和“R”分别表示发射、接收系统.  $E$  和  $N$  分别是激光器腔内复电场强度和载流子密度;  $\alpha$  为线宽增强因子;  $G$  为微分增益系数;  $N_0$  为透明载流子密度;  $\tau_p$  为光子寿命;  $\tau_n$  为载流子寿命;  $\tau$  为光在外谐振腔的往返时间;  $\omega$  为半导体激光器的输出角频率;  $I(t)$  为半导体激光器的抽运电流密度;  $V$  为激光腔的有源区体积;  $q$  为电荷电量; 同时定义带反馈半导体激光器的反馈系数  $k_{T,R}$  和发射机注入到接收机的注入系数  $k_{inj}$  分别为

$$k_{T,R} = \frac{1}{\tau_{in}} \frac{(1 - r_0^2) r_{T,R}}{r_0}, \quad (4)$$

$$k_{inj} = \frac{1}{\tau_{in}} \frac{(1 - r_0^2) r_{inj}}{r_0}, \quad (5)$$

其中  $r_0$  和  $r_{T,R}$  分别是激光器输出端面和外部反射镜面的反射率.  $\tau_{in}$  是光在激光器谐振腔内的往返周期;  $r_{inj}$  为外光反馈注入到激光器谐振腔的注入比. 若要实现混沌同步, 两激光器的参数应近似相等. 数值模拟时两激光器主要参数取值相同, 取自参考文

献 [10] 中的激光器参数值.

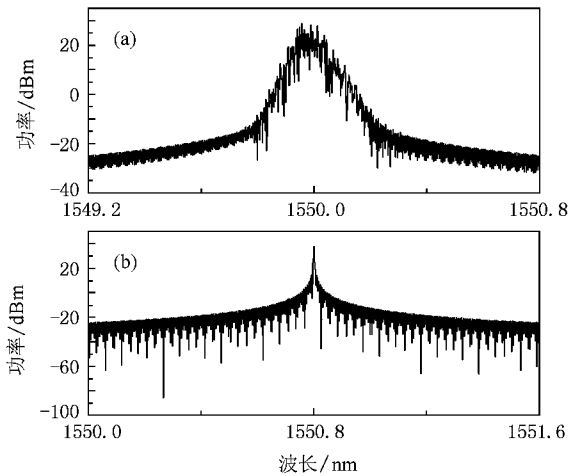


图 2 两个信道的光信号对应的光谱 (a) 混沌光通信信道 (b) 现行光通信信道

在混沌光通信与现行光通信波分复用系统中, 两个信道光脉冲传输的耦合方程<sup>[11]</sup>为

$$\frac{\partial E_1}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha E_1 - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 E_1}{\partial T^2} + i\gamma(|E_1|^2 + 2|E_2|^2)E_1, \quad (6)$$

$$\frac{\partial E_2}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha E_2 - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 E_2}{\partial T^2} + i\gamma(|E_2|^2 + 2|E_1|^2)E_2, \quad (7)$$

式中  $E_1, E_2$  分别是混沌激光和数字脉冲光信号的慢变复振幅,  $z$  是传输距离,  $T$  是随脉冲以群速度  $v_g$  移动的参考系中的时间量度 ( $T = t - z/v_g$ ),  $\alpha$  是光纤损耗常数,  $\beta_2$  是光纤群速度色散常数,  $\gamma$  是光纤非线性克尔效应常数. 所选光纤为非零色散位移光纤, 其参数典型值为  $\alpha = 0.2$  dB/km,  $\beta_2 = 5.1$  ps<sup>2</sup>·

$\text{km}^{-1}$  和  $\gamma = 1.5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ . 按照国际通信联盟 ITU-T 对波分复用系统制定的标准, 选取混沌光通信与现行光通信两者的信道间隔为 100 GHz. 其中, 选用 1550 nm 的波长作为混沌激光传输信道, 选用 1550.8 nm 的波长作为现行数字脉冲光信号传输信道, 两信道的信号光谱如图 2 所示, 图 2(a) 为混沌激光对应的的光谱, 图 2(b) 为现行数字脉冲光信号对应的的光谱. 可以看出, 对于混沌激光光谱, 尽管由于反馈光注入半导体激光器, 其对应的的光谱达到了 11.8 GHz, 但仍然远小于所选的信道间隔 100 GHz.

### 3. 模拟结果及讨论

#### 3.1. 混沌光通信与现有光通信的并行实现

混沌光通信系统中发射机输出的信道波长为 1550 nm 的混沌激光如图 3(a) 所示. 按照 G-P 算法<sup>[12]</sup>求得混沌的维数为 6.37, 同时, 按照改进的最小数据量法<sup>[13]</sup>得到最大 Lyapunov 指数为  $3.6 \text{ ns}^{-1}$ . 我们利用发射机的高维混沌输出作为载波, 其载波带宽约为 4.18 GHz, 混沌激光的平均光功率约为 5.6 mW. 图 3(b) 给出了传输速率为 1 Gbit/s 的非归零码伪随机信号, 将此随机信号通过混沌掩藏方式加入到发射机输出的混沌载波上, 使得传输信号得到很好的加密. 加载信息的混沌激光与激光器 LD 输出的脉冲光信号通过波分复用器一起注入到光纤中进行 80 km 远程传输. 由于混沌激光在光纤信道中传输会受到光纤色散和非线性效应的影响, 从而降低了混沌光通信系统中发射机与接收机的同步性能, 因此, 解调出来的伪随机信号含有其他高频噪声. 但是, 通过添加通带截止频率为 1.5 GHz 的 Chebyshev I 型低通数字滤波器后, 可有效地将信号以外的高频成分滤除, 如图 3(c) 所示. 通过低通滤波器滤波后, 接收机很好地再现了加载到发射机上的伪随机信号, 从而实现了混沌激光保密通信.

对于现行光通信系统, 我们按照光通信系统 OC-48 标准选择码长为  $2^7 - 1$ 、传输速率为 2.5 Gbit/s 的非归零码伪随机信号, 如图 4(a) 所示. 在偏置电流为 14.4 mA 下, 激光器 LD 输出信道波长为 1550.8 nm 的光载波, 用所选的伪随机信号去调制激光器输出的激光得到峰值功率为 7 dBm 的数字脉冲光信号, 与混沌激光通过波分复用器一起注入到光纤进行远程传输. 经过 80 km 光纤传输后, 同样由于

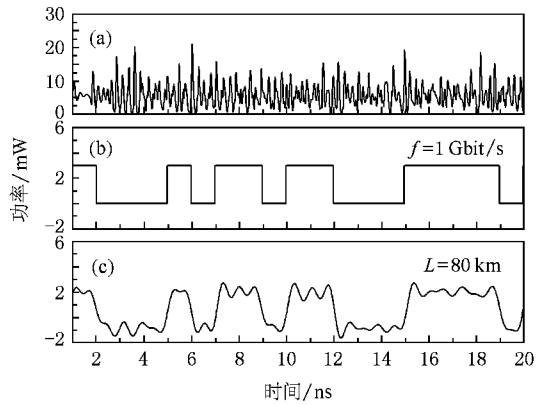


图3 混沌激光通信的数值实现 (a)混沌载波 (b)加载的 1 Gbit/s非归零码伪随机信号 (c)解调并经滤波的伪随机信号

光纤色散和非线性效应的影响, 现行光通信系统在接收端接收到的伪随机信号含有高频成分, 通过通带截止频率为 3.0 GHz 的 Chebyshev I 型低通数字滤波器可有效地滤除掉高频成分, 得到如图 4(b) 所示的解调信号. 可以看到, 发射端调制的伪随机信号在接收端得到了很好的再现, 数值证实了现行的数字光通信也能够与混沌光通信波分复用系统中实现并行传输.

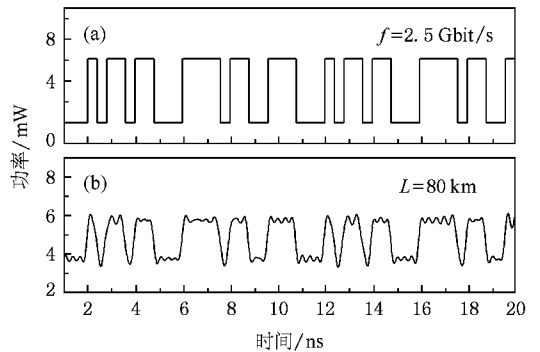


图4 现行数字光通信的数值实现 (a)传输 2.5 Gbit/s 的非归零码伪随机信号 (b)接收到并经滤波后的伪随机信号

#### 3.2. 混沌光通信与现有光通信的相互影响

当两个信道的光在同一根光纤中传输时, 由于 XPM 的存在, 两个信道必然会发生串扰, 很大程度上影响系统的性能. 混沌光通信系统的同步性能可用相关系数来衡量. 相关系数定义如下:

$$\rho = \frac{[P_T(t) - \overline{P_T(t)}][P_R(t) - \overline{P_R(t)}]}{\sqrt{[P_T(t) - \overline{P_T(t)}]^2 [P_R(t) - \overline{P_R(t)}]^2}}, \quad (8)$$

式中,  $\overline{\phantom{x}}$  表示求均值,  $P_T(t)$  和  $P_R(t)$  分别是发射机

和接收机的输出光功率. 相关系数越大, 则系统的同步性越好. 相关系数为 1 时, 系统达到完全同步. 图 5 给出了三种情况下发射机与接收机输出光功率的同步相图. 图 5(a) 表示发射机的混沌输出不经过光纤直接注入接收机, 两者输出的同步图, 其对应的相关系数为 0.93. 图 5(b) 表示发射机的混沌输出经过 80 km 光纤后注入接收机, 两者输出的同步图, 其对应的相关系数为 0.72. 图 5(c) 表示在现行光通信信道干扰的情况下, 发射机的混沌输出经过 80 km 光纤后注入接收机, 两者输出的同步图, 其对应的相关系数为 0.64. 理想的同步所对应的相图是一条经过坐标原点的直线, 对于混沌载波不经过光纤传输, 混沌光通信系统所得的同步图接近于一条直线, 如图 5(a) 所示. 当混沌激光在光纤中传输时, 由于光纤的色散和 SPM 效应的影响, 同步相图直线上的点开始向两边散开, 表明混沌光通信系统的同步性能下降. 而当与现行光通信中的脉冲光信号并行传输时, 现行光通信信道的串扰会进一步降低混沌光通信系统的同步性能. 光纤的传输特性会降低混沌光通信系统的同步性能, 主要原因是混沌载波在光纤信道中传输时会受到光纤的色散和非线性效应作用, 从而使混沌载波发生变化. 图 6 为混沌光通信系统中经过 80 km 光纤传输后输出的混沌载波. 其中, 图 6(a) 表示发射机输出的混沌载波, 图 6(b) 表示经过 80 km 光纤无现行光通信信道作用输出的混沌载波, 图 6(c) 表示经过 80 km 光纤有现行光通信信道作用输出的混沌载波. 可以看到, 光纤的色散和 SPM 效应会展宽混沌载波. 然而, 当有另一信道的脉冲光信号同时在光纤中传输时, 由于干扰信道的 XPM 会引入非线性相移, 从而使混沌载波产生的啁啾与光纤中色散导致的啁啾相互作用, 使得混沌载波不仅得到展宽, 而且混沌载波中随机脉冲序列的前、后沿还产生了一些噪声, 从而降低了系统的同步性能.

混沌激光通信与现行的数字光通信之间发生的串扰主要是由于光纤的 XPM 效应, 而光纤的 XPM 效应对系统性能的影响取决于光纤中传输光脉冲的功率和传输距离. 图 7 给出了在不同峰值功率的脉冲光信号并行传输下, 混沌光通信系统中发射机与接收机输出的相关系数随光纤传输距离的变化情况. 实线表示没有数字脉冲光信号并行传输的情况; 虚线、点划线和短线分别表示峰值功率为 7, 14 和 17 dBm 数字脉冲光信道的串扰情况. 可以看出, 由于光纤色散和非线性效应的影响, 混沌系统的相关系

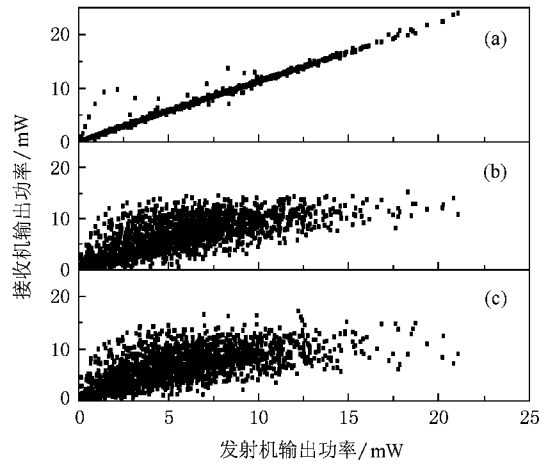


图 5 混沌光通信系统中发射机与接收机输出的同步相图 (a) 不加光纤 (b) 加 80 km 光纤 (c) 加 80 km 光纤并有现行光通信信道的干扰

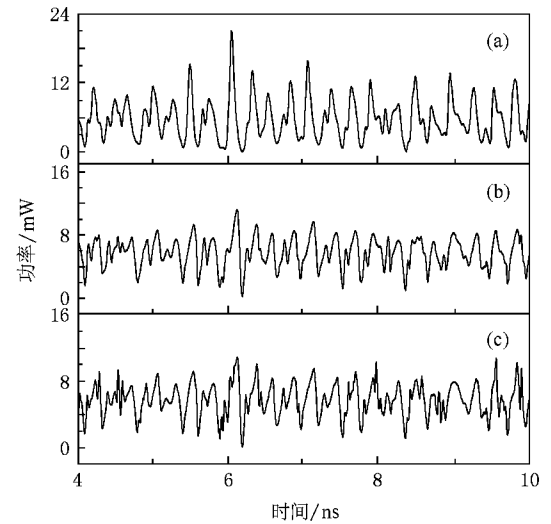


图 6 输出的混沌载波 (a) 发射机输出 (b) 经过 80 km 光纤的输出 (c) 经过 80 km 光纤并有现行光通信信道干扰的输出

数随着光纤传输距离的增加而降低. 当现行光通信信道的峰值功率取值比较小为 7 dBm 时, 混沌激光通信可在传输距离 80 km 内实现无信道串扰的并行传输, 当传输距离超过 80 km 时, 由于 XPM 效应的累积增强, 混沌激光通信开始受到现行数字光通信的串扰. 随着现行光通信信道峰值功率的增加, 混沌激光通信信道与现行光通信信道之间的相互作用会增强, 对于现行光通信信道的峰值功率取值为 14 和 17 dBm, 尽管传输距离为 20 km 时混沌激光通信就开始受到现行光通信的串扰, 但是在传输距离 80 km

内受到的串扰比较小,当传输距离达到 80 km 时,混沌光通信系统对应的相关系数分别降到 0.64 和 0.56,系统仍然可以进行保密通信;当传输距离达到 160 km 时,混沌光通信系统对应的相关系数都降到了 0.02 左右,系统已无法达到同步。

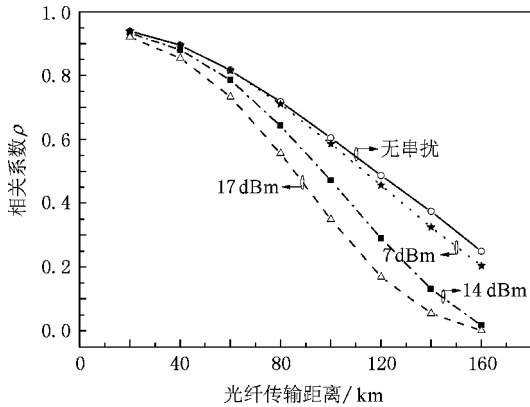


图7 在数字脉冲光信号的串扰下混沌光通信系统相关系数随光纤传输距离的变化情况。实线为无数字脉冲光信号的串扰;虚线、点划线和短线分别表示峰值功率为 7、14 和 17 dBm 的数字脉冲光信号的串扰。

由于光纤中 XPM 效应的存在,不仅现行的数字光通信会对混沌激光通信产生影响,同时,混沌激光通信反过来也会对现行的数字光通信产生影响。现将平均功率为 5.6 mW 的混沌激光与峰值功率为 7 dBm 的数字信号光脉冲进行同时传输,研究混沌光通信对现行数字光通信的串扰。图 8 表示传输距离分别为 80、120 和 160 km 情况下,系统接收到的码长为  $2^7-1$ 、传输速率为 2.5 Gbit/s 的伪随机信号经滤波后所对应的眼图。从这些眼图可以看出,系统接收到的信号质量受混沌激光通信的干扰很小。经计算,当传输距离为 80 km 时,眼图的开启度为 82%,当传输距离达到 160 km 时,眼图的开启度仅降到 70%,表明现行光通信系统仍可保持较好的通信质量。现行光通信系统接收到的信号质量会受到混沌激光通信的影响,这主要是由于混沌光的幅度是随机起伏的,使得现行光通信中的脉冲光信号产生的非线性相移也是随机的,从而引入更多的啁啾,加剧了与色散致啁啾的相互作用,结果是现行光通信系统接收到的信号含有其他高频成分。然而利用数字滤波器可有效地滤除高频噪声,当传输距离为 160 km 时,现行通信系统仍能接收到发射端发送的信号。

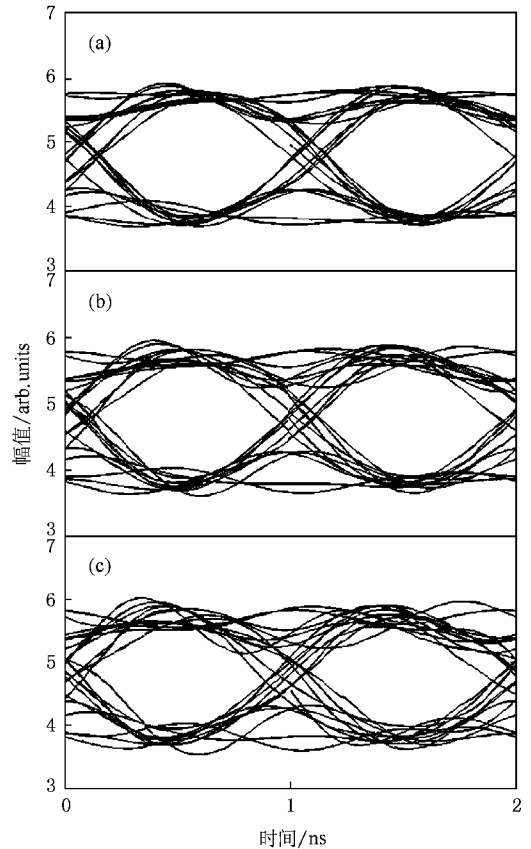


图8 在混沌光信道的串扰下,现行光通信系统接收到 2.5 Gbit/s 伪随机信号对应的眼图。光纤传输距离(a)80 km (b)120 km, (c)160 km。

## 4. 结 论

本文通过建立混沌光通信与现行光通信波分复用传输系统的理论模型,数值证实了混沌激光通信与现行光通信的并行传输,而且分析了混沌激光通信与现行光通信之间的串扰。研究表明,对于信道间隔为 100 GHz,当混沌激光的平均光功率为 7 dBm 和现行的数字脉冲光信号峰值功率低于 17 dBm 时,混沌激光通信与现行数字光通信可在 80 km 内实现并行传输。此外,当现行的数字脉冲光信号峰值功率取为 7 dBm 时,随着光纤传输距离的增加,现行光通信系统接收到的信号质量受混沌激光通信的干扰很小,当光纤传输距离从 80 km 增加到 160 km 时,对应的眼图开启度从 82% 仅降到 70%。通过理论研究混沌激光通信与现行光通信之间的波分复用以及相互影响,为实际应用中搭建混沌光通信与现行光通信并行传输系统提供了参考。

- [ 1 ] Colet P ,Roy R 1994 *Opt. Lett.* **19** 2056
- [ 2 ] van Wiggeren G D ,Roy R 1998 *Science* **279** 1198
- [ 3 ] Paul J ,Lee M W ,Shore K A 2005 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **17** 920
- [ 4 ] Annovazzi-Lodi V ,Benedetti M ,Merlo S ,Norgia M ,Provinzano B 2005 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **17** 1995
- [ 5 ] Argyris A ,Syvridis D ,Larger L ,Annovazzi-Lodi V ,Colet P ,Fischer I ,García-Ojalvo J ,Mirasso C R ,Pesquera L ,Shore K A 2005 *Nature* **437** 343
- [ 6 ] Mirasso C R ,Colet P ,García-Fernández P 1996 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **8** 299
- [ 7 ] Kusumoto K ,Ohstsubo J 2002 *Opt. Lett.* **27** 989
- [ 8 ] Kanakidis D ,Argyris A ,Syvridis D 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 750
- [ 9 ] Kanakidis D ,Bogris A ,Argyris A ,Syvridis D 2004 *J. Lightwave Technol.* **22** 2256
- [ 10 ] Wang Y C ,Li Y L ,Wang A B ,Wang B J ,Zhang G W ,Guo P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4686 ( in Chinese ) [ 王云才、李艳丽、王安帮、王冰洁、张耕玮、郭 萍 2007 物理学报 **56** 4686 ]
- [ 11 ] Agrawal G P 2001 *Nonlinear Fiber Optics* ( 3rd Ed. ) ( San Diego , CA : Academic Press ) p264
- [ 12 ] Grassberger P ,Procaccia I 1983 *Physica D* **9** 189
- [ 13 ] Kim H S ,Eykholt R ,Salas J D 1999 *Physica D* **127** 48

## Wavelength division multiplexing of chaotic optical communication and OC-48 fiber communication<sup>\*</sup>

Zhang Jian-Zhong Wang An-Bang Wang Yun-Cai<sup>†</sup>

( Department of Physics ,College of Science ,Taiyuan University of Technology ,Taiyuan 030024 ,China )

( Received 8 May 2008 ; revised manuscript received 25 May 2008 )

### Abstract

Wavelength division multiplexing transmission of chaotic optical communication and current optical communication is numerically confirmed and analysed. For a 100 GHz channel span ,a 1-Gbit/s digital message extraction is achieved in chaotic optical communication system and a 2.5-Gbit/s digital signal is received in current optical communication system. The results show that when the peak power of digital signal in current optical communication is less than 17 dBm ,chaotic optical communication can realise parallel transmission of 80 km. In addition ,when the peak power of digital signal in current optical communication is 7 dBm ,the quality of the received signal in current optical communication is hardly interfered by signals of chaotic optical communication. As the transmission distance increases from 80 km to 160 km ,the opening of the corresponding eye diagram decreases from 82% to 70% .

**Keywords** : chaotic optical communication , chaotic synchronization , wavelength division multiplexing , inter-channel crosstalk

**PACC** : 0545 , 4230Q , 4281D

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60577019 ) and the International Cooperation Fund of Shanxi Province , China ( Grant No. 2007081019 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : wangyc@tyut.edu.cn